

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ESTUDIO DE RIESGO EN LÍNEAS DE
DISTRIBUCIÓN. COMPARATIVA DE
MODELO PROBABILÍSTICO Y AHP.**

AUTOR: Natalia María Asis Alastrué

TUTOR: Antonio Berlanga de Jesús

DIRECTOR: José Manuel Molina López

Leganés, 26 de Junio de 2014



Universidad
Carlos III de Madrid

ESTUDIO DE RIESGO EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.
COMPARATIVA DE MODELO PROBABILÍSTICO Y AHP.



1 ÍNDICE

1	Índice	3
	Resumen	9
	Abstract.....	10
2	Introducción.....	11
2.1	Presentación	11
2.1.1	La red eléctrica y el sistema eléctrico español	15
2.2	Motivación	19
2.3	Objetivos.....	21
3	Estado del arte	22
3.1	Modelo 1: Modelo de mantenimiento centrado en la fiabilidad (Suecia).....	22
3.1.1	El problema	22
3.1.2	El método.....	22
3.2	Modelo 2: Análisis preventivo-probabilístico de equipos de repuesto.....	28
3.2.1	Punto de partida	30
3.2.2	Paso 1: Calcular la falta de disponibilidad de componentes en el grupo. 30	
3.2.3	Paso 2: Evaluación de las probabilidades de eventos de fallo individuales y el grupo total probabilidad de fallo.....	32
3.2.4	Paso 3: Realización del análisis de piezas de equipos en base a un criterio de fiabilidad determinado o un modelo de costos probabilístico.	34
3.2.5	Paso 4: Repetir los pasos 1 a 3 para todos los años en consideración.	39
3.3	Modelo 3: Estimación del tiempo de vida de los componentes eléctricos de la red de distribución	40
3.3.1	El problema	40



3.3.2	El método.....	40
3.4	Elección del Modelo	52
3.4.1	Modelo 1.....	52
3.4.2	Modelo 2.....	53
3.4.3	Modelo 3.....	54
3.4.4	Selección del modelo de referencia.....	55
3.5	AHP. Proceso de análisis jerárquico	56
3.5.1	Introducción.....	56
3.5.2	Teoría de AHP.....	58
4	Propuesta de modelo probabilístico y jerárquico para una línea.....	68
4.1	Variables para el estudios probabilístico y jerárquico	68
4.2	Estudio de la probabilidad de fallo en función de las variables.....	75
4.2.1	Fijación del coeficiente correctivo b	76
4.2.2	Fijación de la temperatura ϑ	77
4.3	Estudio del proceso análisis jerárquico en función de las variables	82
4.4	Comparación de la probabilidad y AHP	88
4.5	Resolver el problema normalizando la entrada.....	89
4.5.1	Normalización de la temperatura ϑ	90
4.5.2	Normalización del factor correctivo b	90
4.5.3	Normalización de la Sobrecarga S/S_0	92
4.6	Comprobación.....	93
5	Conclusiones	99
6	Trabajos futuros.....	102
7	Plan de Trabajo.....	103



7.1	Planificación	103
7.2	Diagrama de Gantt	107
7.3	Presupuesto	109
8	Índice de Figuras	111
9	Índice de tablas	112
10	REFERENCIAS	113
11	Anexos	114
11.1	Anexo 1: Función de densidad probabilística en función del tiempo con diferentes niveles de carga	114
11.2	Anexo 2: Función de densidad probabilística en función de la temperatura con diferentes niveles de carga	121
11.3	Anexo 3: Función de densidad probabilística en función del factor correctivo con diferentes niveles de carga	129



Universidad
Carlos III de Madrid

ESTUDIO DE RIESGO EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.
COMPARATIVA DE MODELO PROBABILÍSTICO Y AHP.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres y mi hermano, que son los cimientos de mi vida, todo el cariño, apoyo y confianza incondicional que me han dado durante todos estos años. Gracias a ellos he aprendido que las dificultades preparan a las personas comunes para destinos extraordinarios. Os doy las gracias por haberme dado la oportunidad de haber podido estudiar lo que siempre he querido.

También quiero agradecer a todos mis amigos todos los días, que han estado a mi lado, escuchando y animándome cuando todo lo veía oscuro. Y después de tanto tiempo, aquí estamos, finalizando una etapa única en mi vida, y preparada para lo que venga después gracias a vosotros.

Gracias a mis tutores, José Manuel Molina y Antonio Berlanga, por su plena dedicación y atención en cualquier momento que lo he necesitado durante el proyecto. Siempre con buenas caras y paciencia han conseguido sacar un potencial en mí que no sabía que tenía.



Universidad
Carlos III de Madrid

ESTUDIO DE RIESGO EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.
COMPARATIVA DE MODELO PROBABILÍSTICO Y AHP.



RESUMEN

Este proyecto se centra en la comparación de un modelo jerárquico (AHP) de análisis de riesgo de fallo en una línea eléctrica de distribución con un modelo probabilístico.

En primer lugar, se selecciona un modelo probabilístico de la literatura científica existente que cumpla las condiciones especificadas en el presente trabajo y si analiza para conocer su comportamiento.

Seguidamente, se introducen las variables descritas en el modelo probabilístico, en el modelo jerárquico. Para poder incluirlas en este modelo, primero es necesario normalizarlas correctamente y después hacer comparaciones pareadas entre ellas. Con estos resultados, se pueden calcular sus pesos para la función jerárquica y así conocer su fórmula para este caso en concreto.

Con los dos tipos de funciones estudiadas y analizadas, se trata de hacer una comparación y se establece una relación numérica entre ambos tipos de análisis.



ABSTRACT

This project focuses on the comparison between a hierarchical model (AHP) and a probabilistic one regarding the risk assessment of failure in a power distribution line.

First of all, a probabilistic model, which meets the conditions specified in this paper is selected from scientific literature and analyzed according for its behavior.

Then, the variables described in the probabilistic model are introduced into the hierarchical model. So as to be able to include these variables in the model, it is first necessary to normalize them properly and, later, make paired comparisons between them. With these results, we can calculate their weights for the hierarchical model and acquire the formula for this particular case.

With both types of studied and analyzed functions, our intention is to make a comparison and establishing a numerical relationship between the two types of analysis.



2 INTRODUCCIÓN

2.1 PRESENTACIÓN

El mantenimiento de las redes eléctricas de transporte y distribución es un tema de creciente importancia tanto para las empresas encargadas de esta actividad como para la sociedad y los gobiernos, que deben asegurar que se cubre la demanda, por parte de las empresas de suministro eléctrico, ya que se regula como un servicio básico. Su correcta realización incide de forma directa en la necesaria continuidad y calidad del suministro eléctrico, con consecuencias que son bien conocidas.

El 30 de junio de 2004 se produjo un apagón en las ciudades de Sevilla y Granada[1], durante tres días, donde unos 35.000 clientes se quedaron sin suministro por dos averías en el tendido eléctrico debido a un mal cálculo, por parte de la empresa distribuidora de la previsión de la demanda eléctrica. Los efectos del corte fueron rápidamente visibles en el tráfico debido a la inactividad de numerosos semáforos, que obligaron a poner en marcha un dispositivo especial para regular la circulación en las principales calles. El apagón también afectó al pleno del Parlamento andaluz, al hospital Virgen Macarena, que activó su grupo electrógeno, y a nivel doméstico, donde numerosas familias no pudieron cocinar, hacer frente al calor de ningún modo, etc. El grado de interconexión de las distintas redes nacionales propicia que los fallos del sistema puedan tener un alcance internacional. Así ocurrió el 4 de noviembre de 2006[2], donde un fallo en la red eléctrica europea (zona de Alemania) dejó durante una hora sin luz a millones de usuarios en Francia, Alemania, Italia, Bélgica y España. Como consecuencia de éste suceso, muchos trenes se vieron obligados a interrumpir su recorrido, algunos metros de ciudades fueron detenidos, numerosas personas quedaron atrapados en ascensores, etc. De la investigación realizada por la UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity) se concluye que los principales motivos del incidente fueron tres:



En primer lugar, E.ON Netz, el gestor del sistema de transporte de electricidad, donde se originó el fallo, no aplicó el procedimiento de seguridad y ni siquiera contaba con el conjunto de instrumentos técnicos para comprobar la operación del sistema dentro de los límites de seguridad.

En segundo lugar, otros gestores del sistema de transporte europeos no recibieron información sobre la actuación del gestor alemán.

En tercer lugar, también hay que achacar parte de la responsabilidad a la insuficiencia de las inversiones, tanto en el plano de la fiabilidad como en el de la gestión de la red en sí. Otros aspectos que han de abordarse, son el comportamiento de las redes de distribución y, en caso de perturbaciones, la desconexión y reconexión de cargas y generadores.

Esto nos da una idea de la importancia que puede tener el mantenimiento de las redes de distribución eléctricas de alta tensión, para una sociedad completamente dependiente de este servicio. Esto explica la creciente atención de los gobiernos por mejorar el sistema a través de su regulación, y el incremento de la gravedad de las sanciones por la interrupción del servicio. Además, una gran parte de la reputación pública repercute en la competitividad de las empresas y ésta en gran medida depende de que el servicio se preste correctamente y con la continuidad exigible. Las empresas se encuentran ante el desafío de destinar los recursos mínimos que garanticen el servicio de suministro.

El mantenimiento y seguridad en el suministro se vuelve una actividad crítica en el concepto de redes inteligentes o “Smart grid”.

Este nuevo término se desarrolló en 2006 por la “European Technology Platform for Smart Grids”[3] y se refiere a una red de suministro de electricidad en la que pueden integrarse de forma inteligente las acciones de todos los usuarios que se conectan a la misma, los generadores, los consumidores y los que hacen ambas cosas, con el fin de distribuir de forma segura, eficaz, económica y sostenible el suministro de electricidad.



También ha sido definida como la mejora de la infraestructura de los elementos que componen el sistema de suministro de energía, incluyendo la generación, la transmisión, la distribución y el consumo, mediante el uso de las tecnologías de la información, con el objetivo de optimizar la entrada y distribución de energía y economizar la operación y el mantenimiento [4].

Las Smart Grid centran su actividad en dos objetivos destacados: la automatización de la información en tiempo real, y la estandarización de la red para permitir que todos sus componentes sean capaces de comunicarse entre sí. Estos avances tecnológicos harán que se ahorre en costes en todo el sistema y mejorará la eficiencia de la red.

Las ventajas que se pueden obtener de una red inteligente:

- ✓ Monitorización remota y control de la producción y consumo de energía.
- ✓ Una mejora en la toma de decisiones del consumidor sobre su consumo de energía.
- ✓ Reducción de costes de electricidad debido a un consumo más preciso y sensible.
- ✓ La comunicación bidireccional entre la red y los usuarios finales.
- ✓ Medición precisa utilizando tecnología digital.
- ✓ Gestión más eficaz de la red por parte de los proveedores.
- ✓ Relación entre proveedores y consumidores de energía con más información y cooperación.

Esta nueva tecnología requiere un ámbito coordinado de protocolos y normas, respetadas por todos los miembros de la red.

Del mismo modo que internet o un cerebro humano, miles de millones de conexiones y elementos se encuentran enlazados entre sí mientras realizan el seguimiento y medición con un alto nivel de seguridad. Así se puede predecir con mayor exactitud las necesidades de energía y analizar en tiempo real su uso, y de este modo, realizar un mantenimiento más exacto y personalizado. Los consumidores, gracias a esta tecnología, pueden monitorizar y tomar decisiones sobre sus consumos.



El mantenimiento de la red tiene distintas modalidades. La primera se denomina **correctiva**, que es el procedimiento clásico para solucionar los defectos y las incidencias que se van presentando en los elementos pertenecientes a la red de distribución eléctrica (reparación de averías que puedan surgir). Como tal, el mantenimiento correctivo atiende a dos opciones de conservación:

- 1) Mantenimiento correctivo inmediato, como su propio nombre indica, es el tipo de reparación que se realiza de manera seguida a la notificación del fallo que obligó a detener el servicio.
- 2) Mantenimiento correctivo diferido, este tipo implica la paralización del servicio en cuestión para poder realizar la reparación necesaria.

Como, en todo caso, este tipo de mantenimiento puede suponer una interrupción, ya sea momentánea o prolongada en el suministro, un objetivo principal de la gestión del mantenimiento de la red será rebajar las intervenciones correctivas hasta un nivel óptimo posible, ya que este tipo de incidencias no pueden evitarse en su totalidad.

Desde hace varias décadas, la demanda de los consumidores por esa calidad y continuidad en el servicio, y la vigilancia y sanciones de los gobiernos, ha hecho que las empresas de distribución comiencen a fomentar y desarrollar **el mantenimiento preventivo** de la red de distribución de alta tensión. Este tipo de conservación de las redes eléctricas presenta las siguientes características:

- 1) Es sistemático, lo que implica planificar revisiones de las líneas, parques, transformadores y otros elementos eléctricos de un sistema;
- 2) Se apoya en el conocimiento histórico y la experiencia de especialistas.

El mantenimiento preventivo, puede ser a su vez:

- a) Programado: en base a una variable típica de mantenimiento, como es el tiempo de funcionamiento, cantidad producida, kilometraje...
- b) Predictivo: consiste en determinar en todo momento la situación técnica-real del producto mientras se encuentra funcionando.



- c) De oportunidad: aquel realizado en el momento de parada o no utilización del producto, para no afectar a la continuidad del servicio prestado.

El mantenimiento predictivo, se caracteriza por tratar de prever las fallas antes de que se produzcan para adelantarse al momento en que la red deja de trabajar en condiciones óptimas, a través de la identificación y valoración de variables, normalmente físicas.

Este tipo de mantenimiento nos permite tener un control del proceso muy riguroso y objetivo, pero también obliga a las empresas a realizar una gran inversión inicial (diseño y puesta en marcha de los soporte técnico y lógico) y a lo largo del tiempo (anticipación de costes de reposición y sustitución de equipos), por ellos, el mantenimiento como tal, forma parte de las estrategias de las empresas, para ganar competitividad y optimizar costes.

Cabe mencionar que en algunos procesos industriales de mantenimiento será más rentable conservar el correctivo que invertir en una tecnología preventiva de mantenimiento.

Con todo, no podemos olvidar que la producción, transporte, distribución y suministro de energía eléctrica supone un sistema muy complejo, que comprende distintas operaciones y elementos.

2.1.1 La red eléctrica y el sistema eléctrico español

Según UNESA (Asociación Española de la Industrial Eléctrica):

”La red eléctrica es el conjunto de líneas, centros de interconexión eléctrica y distintos equipos, que mantienen conectados entre sí a los centros de producción y de consumo de electricidad de nuestro sistema eléctrico.”

Mientras que el sistema eléctrico español[5] se define como el conjunto de elementos (organizaciones y empresas) que operan de forma coordinada con el fin de satisfacer la demanda de energía eléctrica de los consumidores. Ante todo hay una máxima que



caracteriza el sistema eléctrico y es el hecho de que la energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades (a día de hoy no resulta económicamente viable, aunque técnicamente hay muchas soluciones), así que la electricidad que se genera es igual en todo momento a la que se consume. Este hecho conlleva que aparezcan distintos mercados y que haya una coordinación total entre el Operador del Sistema Eléctrico (REE), el Operador del Mercado Eléctrico (OMIE) y los distintos agentes del mercado.

El sistema eléctrico español está dividido en varios subsistemas interconectados entre sí que van desde la generación de energía eléctrica, procedentes de fuentes renovables o no renovables, hasta el consumo de los clientes. Esto incluye:

1. **Los centros o plantas generadoras**, donde se produce la electricidad. Puede haber productores de Régimen Ordinario y de Régimen Especial. Según La Ley 54/1997, los productores de Régimen Especial son aquellos cuyas instalaciones tengan menos de 50 MW de potencia instalada y se utilice como energía primaria alguna energía renovable no consumible, biomasa, residuos no renovables o cogeneración de alto rendimiento. El resto de productores (gas, carbón, nuclear, etc.) se consideran de Régimen Ordinario.
2. **Las líneas de transporte de la energía eléctrica de alta tensión (AT)**, entre 380 y 132 kV. Operado por REE (Red Eléctrica Española), desempeñan dos funciones. Como operador del sistema eléctrico español se encarga de coordinar a los distintos agentes implicados en el flujo físico de la electricidad para asegurar el suministro y además es el gestor de la red de transporte. Dentro de REE los responsables de la gestión y operación del sistema de generación y transporte de energía son el **Centro de Control Eléctrico (Cecoel)** y una unidad integrada para el régimen especial llamada Centro de Control para el Régimen especial (Cecre).
3. **Las estaciones transformadoras** (subestaciones) que reducen la tensión o el voltaje de la línea (Alta tensión/Media tensión, Media tensión/Baja tensión).

4. **Las líneas de distribución de media (MT) (tensión entre 132 y 1 kV) y baja tensión (BT) (tensión inferior a 1000 V).** Están repartidas por distintas áreas de toda la geografía española y se encargan de llevar la electricidad desde las subestaciones de transformación hasta los consumidores. En la mayor parte de los casos reciben esa electricidad del transportista” (REE).

Las principales distribuidoras en España son: Endesa (El 92% de Endesa es propiedad de su matriz Enel. Por tanto, es italiana), Iberdrola (Española), Gas Natural Fenosa (Española. Es la antigua Unión Fenosa), HC Energía (El 96,6% de HC Energía es propiedad de EDP. Por tanto, es portuguesa) y E-On (Alemana). Estas empresas de carácter privado se reparten por el país como se muestra la Figura 1.

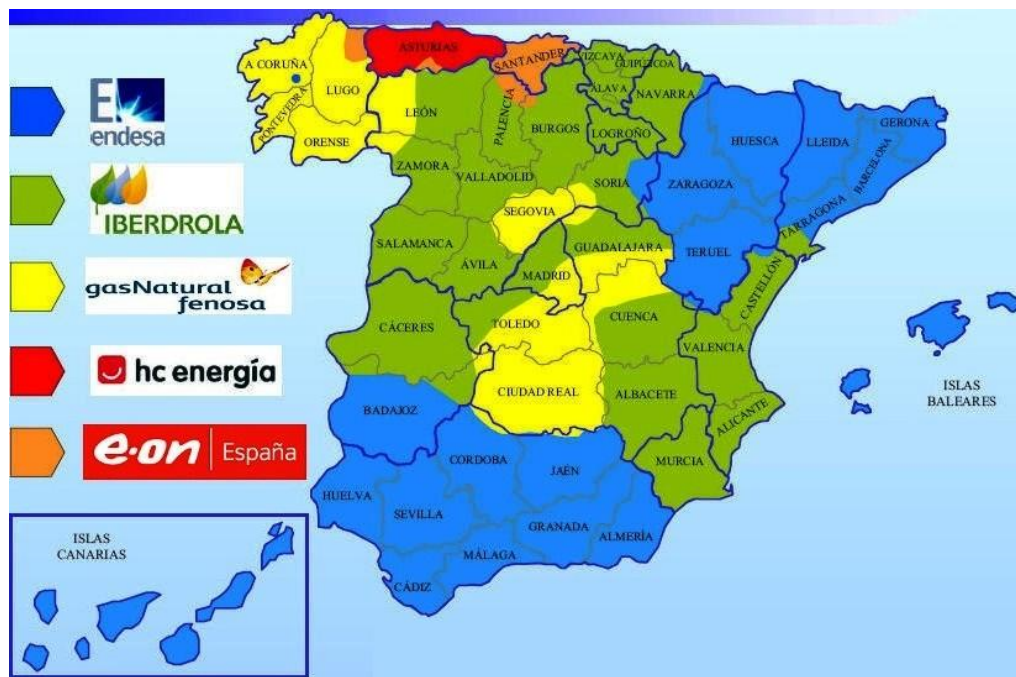


FIGURA 1: MAPA DE LAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS EN ESPAÑA

5. **Los clientes**, aquellos individuos que demandan electricidad al sistema, incluyendo consumidores domésticos, industriales y el transporte eléctrico. Existe una gran cantidad de comercializadoras de electricidad, divididas en dos grupos: las de último recurso (potencia menor de 10kW), compuestas por las 5 distribuidoras, y las de libre mercado, compuesta por decenas de empresas.

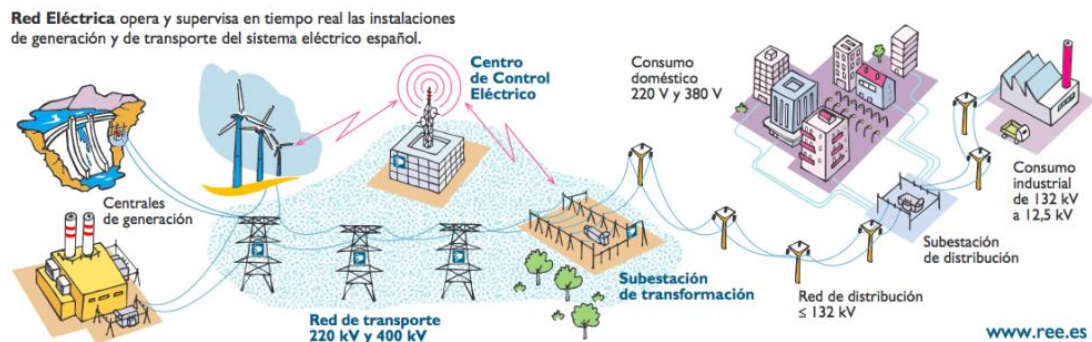


FIGURA 2: ESQUEMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

La interconexión entre sistemas eléctricos permite garantizar el suministro eléctrico a los consumidores en el caso de que un sistema no pudiese generar suficiente energía para satisfacer una demanda. Esto sucede cuando se produce un pico de consumo o cuando hay una parada o avería en el sistema. Por ello, la interconexión en el sistema eléctrico proporciona estabilidad y seguridad en el servicio.

En el presente proyecto, debido a la complejidad e interconectividad del sistema eléctrico, explicados anteriormente, se estudiará de manera aislada únicamente el mantenimiento de las líneas de distribución de media tensión.



2.2 MOTIVACIÓN

La dificultad específica del mantenimiento predictivo es obtener la base de conocimiento para realizar las hipótesis de reparación y sustitución, debido a la complejidad del propio sistema y la variabilidad de las condiciones externas de carácter ambiental, económico o regulatorio.

En la práctica podemos distinguir dos tipos de enfoque: a) aquéllos que utilizan modelos probabilísticos y b) y aquéllos que no los utilizan. La ventaja de la utilización de modelos probabilísticos son al menos teóricamente dos: 1) ofrecen información en términos de riesgo según una función de distribución estadística temporal, no tanto de jerarquía, que permite una toma de decisión de mayor calidad, 2) permite la generación de modelo teóricos extrapolables a distintas compañías, sin perjuicio de la inevitable adaptación que en cada caso pueda producirse.

En el estudio predictivo de fallo en la línea debe diferenciarse dos categorías: la probabilidad de fallo y el efecto del fallo (o severidad).

La probabilidad de fallo indica cómo de posible es que un determinado elemento de la red de distribución no funcione correctamente.

El efecto del fallo explica las consecuencias de éste suceso en el caso de producirse, este efecto negativo puede suceder en el mismo proceso, en uno posterior o en el cliente final. Para estimar el grado de severidad de un fallo, se debe tener en cuenta, en primer lugar, la consecuencia que éste tiene sobre el cliente (su grado de satisfacción cuando sucede el fallo y el grado de afección).

Las redes de distribución de alta tensión poseen una gran cantidad de variables probabilísticas de fallo, tanto endógenas como exógenas, cuyos valores, aparte de ser numerosos no son fácilmente accesibles, ya que forman parte de los datos confidenciales de las empresas encargadas en la distribución eléctrica, como parte de la



ventaja estratégica de ésta. Lo que dificulta en gran medida modelar las líneas de alta tensión con una función de probabilidad.

Por otro lado, los modelos no probabilísticos se basan en otro tipo de variables que no está asociadas a una probabilidad, por ejemplo, datos históricos, experiencia de expertos en el campo de estudio y se considera que la información extraída es la verdad. Tienen un alto riesgo de invalidez producido por la introducción de sesgo (diferencia entre el valor esperado de un estimador y el verdadero valor del parámetro). Cada unidad no tiene igual probabilidad de participar en la muestra. Existen muchos tipos de modelos no probabilísticos, entre ellos cabe destacar:

Fuzzy logic (lógica borrosa): permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales, al contrario que con la lógica convencional, permite trabajar con información poco definida e imprecisa. Se puede aplicar para procesos demasiado complejos, cuando no existe un modelo de solución simple o modelo matemático preciso.

Artificial neural network (red neuronal artificial, ANN): modelo que intenta reproducir el comportamiento del cerebro. Este modelo realiza una simplificación averiguando cuáles son los elementos relevantes del sistema, bien porque la cantidad de información de que se dispone es excesiva o bien porque es redundante. Una elección adecuada de sus características más una estructura conveniente, es el procedimiento convencional utilizado para construir redes capaces de realizar determinada tarea.

Entre los tipos de modelos no probabilísticos se encuentra el jerárquico que consiste en la comparación simple de dos elementos del mismo nivel jerárquico que permite determinar la importancia o preferencia relativa que tendrán en el cálculo del valor inmediatamente superior en la jerarquía.



2.3 OBJETIVOS

El presente proyecto cuenta con la existencia de un modelo no probabilístico, facilitado, con las lógicas condiciones de confidencialidad, por una empresa de distribución. Este modelo se utilizará como pauta comparativa con modelos probabilísticos formulados en la literatura científica. Concretamente con el realizado por X. Zhang, E. Gockenbach, V. Wasserberg, y H. Borsi, «Estimation of the Lifetime of the Electrical Components in Distribution Networks».

La finalidad de este proyecto es la demostración de una relación entre un modelo probabilístico y un proceso analítico jerárquico (AHP) para el caso de un conductor. Para ello, las variables a estudiar deben analizarse previamente, y en el caso del AHP, deben normalizarse. El modo más sencillo de comprobación de una correspondencia entre variables y también modelos es gráficamente. Mediante el análisis de un número muy alto de datos se puede aproximar todavía más a un resultado real.



3 ESTADO DEL ARTE

No existen una gran variedad de modelos de mantenimiento predictivo. La complejidad de los modelos, la dependencia respecto de la topología de la red, la incidencia de condiciones ambientales y de localización, el carácter estratégico del modelo de negocio de las distintas empresas y, también, la relativa novedad de esta planteamiento explican esta escasez de modelos de referencia que permitan un análisis concreto.

Fundamentalmente existen tres planteamientos descritos de forma detallada en la literatura científica y técnica: a) modelo de mantenimiento centrado en la fiabilidad, b) análisis preventivo-probabilístico de equipo de repuesto y c) estimación del tiempo de vida de los componentes eléctricos de la red de distribución.

3.1 MODELO 1: MODELO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA FIABILIDAD (SUECIA)

3.1.1 El problema

Éste primer método[6] fue desarrollado para poder estudiar la fiabilidad del sistema eléctrico mediante la evaluación de los componentes críticos de éste. El documento se basa en la realización de medidas terrenales en sistemas de distribución de potencia reales, en Suecia.

3.1.2 El método

La característica principal del mantenimiento centrado en la fiabilidad es que se enfoca en la preservación de la función del sistema donde se da prioridad a los **componentes críticos**, lo que hace poder conocer en gran medida qué variables tienen en cuenta en este estudio a la hora de calcular la probabilidad de fallo de dichos componentes.



El estudio trabaja con los datos de entrada de dos sistemas de distribución diferentes en Suecia: un sistema rural de líneas de alta tensión en el sur de Suecia, y un sistema de cable subterráneo urbano en el centro de Estocolmo, el sistema Birka.

Este método está compuesto de dos partes:

3.1.2.1 Evaluación de fiabilidad

Para deducir los tipos de fallo se desarrolló en el Centro de Competencia de Ingeniería Eléctrica en KTH, Estocolmo, una técnica de modelado de redes que se utiliza, mediante un código informático llamado RADPOW (Reliability Assessment of Electrical Distribution Systems / evaluación de la fiabilidad de los sistemas de distribución eléctrica).

Basándose en el enfoque analítico, RADPOW evalúa los índices de una carga puntual, y los índices globales del sistema:

- **Los índices de una carga puntual:** tasa de fallo $\lambda = [int/año]$, el tiempo anual de interrupción (no disponible) (U) [h/año], la duración media de interrupción (r) [h/int], y la energía media no suministrada (E) [kWh/año].
- **Los índices del sistema:** SAIFI [int/año·cliente], SAIDI [h/año·cliente], CAIDI [h/int], y AENS [kWh/año·cliente].

El primer conjunto de índices asume una relación constante entre la reducción de las tasas de fallo y el efecto del mantenimiento preventivo. El segundo conjunto supone que este coeficiente es dependiente del tiempo. En el primer caso, sólo depende de los efectos de mantenimiento preventivo mientras que en el segundo caso, es también dependiente del tiempo, y la reducción de la tasa de fallo es una consecuencia de las acciones del mantenimiento preventivo considerados para el componente específico que se estudia. La formulación del modelo de tasa de fallo del Caso II es una tarea complicada. Esta actualmente se ha hecho para un tipo de componente, cables subterráneos, que ha demostrado ser crítica para la fiabilidad de uno de los sistemas



utilizados en estos estudios. Los detalles de la teoría subyacente son demasiado extensos para ser desarrollado en este trabajo, por lo que sólo los principios generales, los resultados y las aplicaciones están incluidos.

3.1.2.2 *Evaluación económica*

La evaluación económica es la etapa final del análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad que relaciona los beneficios y los costes debido a los efectos del mantenimiento. La motivación para cualquier estrategia de mantenimiento preventivo es que el coste de la aplicación de la medida de mantenimiento debe ser inferior a la no elección de ninguna medida en absoluto. En el caso de no realizar o efectuar un pequeño mantenimiento preventivo, entonces la probabilidad de que se produzca un fallo en el sistema será más probable que ocurra y como resultado de este suceso, se necesitarán más acciones de reparación, es decir, en un mantenimiento más correctivo. Por lo tanto, la cuestión importante es comparar los costos asociados a los diferentes métodos de mantenimiento, incluyendo tanto mantenimiento preventivo como correctivo con el objetivo de minimizar el coste total de mantenimiento.

El análisis de costos propuesto considera:

- El costo del fallo;
- El costo de mantenimiento preventivo;
- El costo de la interrupción.

El método de mantenimiento óptimo y la estrategia de mantenimiento preventivo es la solución que minimiza la suma de estos tres costes. Sin embargo, en algunos casos puede no ser necesario incluir, por ejemplo, para una comparación simple o de primer orden de las estrategias.

Las evaluaciones económicas se realizan utilizando técnicas fundamentales: los costes son evaluados una vez al año con un supuesto aumento debido a la inflación d_1 y por



otra parte, las inversiones en medidas de mantenimiento preventivo se distribuyen en el tiempo restante del período de evaluación T . Por último, se evalúa el valor actual de valor de los costos totales anualizados. El valor actual de un valor de un desembolso a pagar después de años con la tasa de descuento, se obtiene multiplicando por el factor de valor actual vale $PV_f(n, d) = (1 \pm d_2)^{-n}$

3.1.2.3 Pasos del modelo

Las principales etapas del mantenimiento centrado en la fiabilidad son los siguientes.

- Etapa 1: **Análisis de fiabilidad del sistema:** define el sistema y evalúa los componentes críticos que afectan a la fiabilidad del sistema. Los pasos a seguir en este análisis preliminar son:
 1. Definir el modelo de fiabilidad y los datos de entrada requeridos (datos de la red, de la fiabilidad de los componentes, de los clientes...).
 2. Identificar los niveles críticos de voltaje y los componentes para la fiabilidad del sistema basados en los análisis de fiabilidad. (los resultados del análisis previo nos dará un orden prioritario de los componentes a los que se aplica del mantenimiento preventivo.
- Etapa 2: **Componentes de modelado fiabilidad:** analiza los componentes en detalle y, con el apoyo de los datos de entrada apropiados, define la relación cuantitativa entre medidas de fiabilidad y mantenimiento preventivo. Ésta será la etapa en que se centre nuestro estudio. Continuando los pasos anteriores, el análisis de los componentes tiene el siguiente orden:
 3. Identificar las causas de fallo mediante un análisis de modo de fallo para cada tipo de componente.
 - a. Identificar las causas de fallo desde el punto de vista de las funciones el componente en cuestión, modos de fallo y eventos de fallo.

- b. Determinar el porcentaje por el que cada causa contribuye al número total de fallos a partir de los datos de interrupción y de la experiencia.
- c. Identificar datos experimentales de interrupción debido a estas causas de interrupción.
- d. Identifica posibles efectos alternativos de los métodos de mantenimiento preventivo.

4. Definir el modelo de tasa de fallo:

La tasa de fallo de cada componente i será:

- Asumiendo que la tasa de fallo será igual a la media de fallos por interrupción:

$$\lambda^i = \lambda_a^i$$

- Asumiendo que la tasa, en este caso, se puede obtener como la suma de todas las diferentes causas k de fallo de cada componente i: (depende del tiempo)

$$\lambda^i(t) = \sum_{k=1}^m \lambda_k^i(t)$$

5. Modelo del efecto del mantenimiento preventivo en la fiabilidad de cada causa de fallo

El modelo de tasa de fallo asociada a cada método de mantenimiento preventivo j, viene dado por:

- Considerando el primer conjunto de índices y asumiendo que: la tasa de para el análisis del componente se reduce con el mismo porcentaje y que el efecto de aplicar el mantenimiento preventivo se traduce en una reducción porcentual x_{jk} de las causas de fallo actual k, donde $x_{jk} \in [0,a]$ y a son el porcentaje de contribución a los fallos totales de esa causa de fracaso:

$$\lambda^i(PM) = \lambda_{av}^i \left(1 - \sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^m \frac{x_{jk}}{100} \right)$$

- Para el segundo conjunto se desarrolla un modelo que relaciona funcionalmente entre la fiabilidad y el mantenimiento predictivo, en función del tiempo. La fórmula es:

$$\lambda^i(t, PM) = \sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^i(t, PM)$$

6. Plantear diferentes planes de aplicación para el mantenimiento preventivo y evaluar los efectos resultantes en la tasa de fallo de los componentes.
- Etapa 3: **Fiabilidad del sistema y análisis de costo / beneficio:** pone los resultados de la Etapa 2 en una perspectiva de sistema (conjunto global), y evalúa el efecto de mantenimiento de los componentes de la fiabilidad del sistema y el impacto en el precio de las diferentes estrategias de mantenimiento preventivo. El método a seguir sería:
7. Definir e implementar estrategias de diferentes mantenimientos preventivos.
 8. Estimar el resultado de la tasa de fallo. Este paso implica el desarrollo del modelo de tasa de fallo para el componente aplicado con la estrategia de mantenimiento preventivo. La función de tasa de fallo resultante proporciona los datos de entrada para el tipo de componente al modelo de fiabilidad del sistema.
 9. Comparar la fiabilidad del sistema para cada estrategia de mantenimiento preventivo. Al realizar en análisis de fiabilidad, se introducen los datos



estimados en el paso anterior y se obtienen como resultado los índices tanto del sistema como de las cargas puntuales. Ahora se podrán comparar estos índices conociendo el impacto de la estrategia de mantenimiento.

10. Identificar la estrategia de costes más adecuada para el mantenimiento. Basado en la evaluación económica, explicada anteriormente.

Estas tres etapas indican un aspecto central del método: que el análisis se mueve desde el nivel sistema al nivel componentes y de nuevo al nivel sistema.

3.2 MODELO 2: ANÁLISIS PREVENTIVO-PROBABILÍSTICO DE EQUIPOS DE REPUESTO

El objeto de este estudio no es directamente el análisis probabilístico del fallo de las líneas eléctricas, pero se ha considerado porque, tiene relación con el problema que se analiza en este proyecto y constituye una de las pocas metodologías disponibles en la literatura consultada.

El problema es la gestión de los equipos de repuesto, en relación con los costes de esta actividad dentro de la empresa. Es evidente que uno de los factores que debe considerarse dentro de este enfoque es el riesgo de fallo de los componentes del sistema eléctrico; y por ello **el autor dentro de su estudio formula un modelo de cálculo de probabilidad de fallo**, basado en el teorema de la probabilidad total. Por ello, en este análisis deberá tenerse en cuenta que:

- a) La solución que realiza este autor forma parte de un modelo más amplio (que incluye el sistema en su conjunto y el problema de la disponibilidad o no de los equipos)



b) Está orientado, como ya se ha dicho, a la optimización de la gestión de los costes de equipos de repuesto.

El segundo de los modelos se encuentra en el libro Risk assessment of power systems models, methods, and applications, de W. Li y I. Ebrary, [7] .

El punto de partida es la necesidad de contar con equipos de repuesto que garanticen la continuidad del servicio. Hay dos tipos de esquemas de repuestos de los equipos utilizados en los sistemas de energía. El esquema de repuesto off-line se refiere a la reserva en el almacenamiento que se instalará para reemplazar una pieza de los equipos averiados. Redundancia on-line es otro esquema de equipo de repuesto. Por ejemplo, se instalan algunos reactores o condensadores conmutables adicionales pero no energizados en el estado normal del sistema y podrían ser cambiados de inmediato cuando sea necesario. Un fallo de inventario en los equipos de repuesto puede traducirse en la necesidad de interrumpir el suministro para la reparación del equipo averiado o bien en un sobrecoste por contar con equipos que no cumplen ninguna función. Otro factor relevante es el envejecimiento de los equipos porque implica una mayor probabilidad de fallo y por lo tanto una mayor necesidad de repuestos. Por ello, un análisis depurado de las necesidades de equipos de repuesto es un reto en la planificación de las empresas. Existen dos cuestiones básicas en el análisis de piezas de equipamiento:

1. ¿Cuántas piezas de repuesto son necesarios y cuando deben reemplazarse para mantener la fiabilidad del sistema?
2. ¿Cómo pueden justificarse económicamente los repuestos?

Además, la política de repuestos comunes compartidos por un conjunto de equipos se ha ido generalizando dentro de un entorno competitivo como es la industria de la energía. Tradicionalmente, por ejemplo, el principio de seguridad $N - 1$ ha sido ampliamente utilizado para transformadores de subestación. Cada subestación está a menudo diseñado para tener dos o más transformadores en paralelo, de modo que la carga pico



se puede redireccionar cuando falla uno de los transformadores. Este es un criterio seguro, pero muy caro. En comparación con el principio N- 1 de la seguridad en cada subestación, la estrategia común del transformador de repuesto puede evitar considerables gastos de capital y aun así asegurar un nivel de confianza suficiente.

3.2.1 Punto de partida

Los repuestos se consideran para un grupo de aparatos. Cada componente del grupo tiene su probabilidad de fallo o no disponibilidad y cuando falla, un repuesto debe ser instalado en servicio para garantizar el funcionamiento normal del sistema. Por lo tanto, el número de repuestos necesarios depende de la exigencia de fiabilidad grupo. Con la falta de disponibilidad de componentes individuales puede utilizarse la simulación de Monte Carlo[8] o la técnica de enumeración para evaluar la probabilidad de fallo del grupo con y sin piezas de repuesto.

El análisis del equipo de repuesto de un grupo de equipos incluye 4 pasos

3.2.2 Paso 1: Calcular la falta de disponibilidad de componentes en el grupo.

Aunque en muchas evaluaciones de riesgo, sólo se considera fallos reparables el autor propone que su modelo contemple dos modos de fallo en equipos del sistema eléctrico: fallos reparables y fallos de envejecimiento. Sin embargo, un modelo para la no disponibilidad debido a fallos de envejecimiento debe tener en cuenta el análisis de las piezas del equipo, ya que el fallo por envejecimiento es una de las razones por las que se necesitan repuestos, sobre todo para un grupo de aparatos de cierta edad.

La falta de disponibilidad de un componente del sistema debido a fallas reparables se define por la siguiente fórmula:

$$No\ Disponibilidad_r = \frac{TMR}{TMR + TMF} = \frac{f \cdot TMR}{8760}$$

Donde TMR es el tiempo medio de reparación (horas), MTTF el tiempo medio hasta el fallo (horas), y f la frecuencia media de fallo (fallos/año).

Por otra parte, para un componente del sistema determinado con la edad de T años, su falta de disponibilidad debido a un fallo por envejecimiento dentro del período t se puede calcular utilizando las siguientes dos ecuaciones:

$$U_a = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^N P_i \cdot [t - (2i - 1)D/2]$$

Donde N es el número de los intervalos iguales en la que el período t se divide, D es la longitud de cada intervalo, y P_i es dada por

$$P_i = \frac{\int_T^{T+iD} f(t)dt - \int_T^{T+(i-1)D} f(t)dt}{\int_T^{\infty} f(t)dt} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

Donde $f(t)$ es una función de dos parámetros de probabilidad de densidad fallo. Si se supone que se trata de una distribución normal, los dos parámetros son las estimaciones de la vida media y la desviación estándar para el mismo tipo de equipo. Si se utiliza la distribución de Weibull, que son las estimaciones de los parámetros de escala y forma.

Por último, el fallo total de disponibilidad de un equipo puede ser calculado utilizando el concepto de unión de probabilidad de disponibilidad de la siguiente manera:

$$U_t = U_r + U_a - U_r U_a$$

Es preferible utilizar la no disponibilidad total si el enfoque de estado de enumeración es utilizado en la evaluación de riesgos del grupo. Si se utiliza el método de simulación de Monte Carlo[8] se crean dos números aleatorios independientes, uno de U_r y otro de U_a que permiten simular los fallos reparables se forma automática.



3.2.3 Paso 2: Evaluación de las probabilidades de eventos de fallo individuales y el grupo total probabilidad de fallo.

La evaluación del riesgo del grupo se puede realizar utilizando la simulación de Monte Carlo[8] o técnica de estado de enumeración. El procedimiento mediante el método de enumeración de estado se da para explicar el concepto. Considere la posibilidad de un período de tres grupos de componentes

Probabilidad de evento		
Evento No.	Evento	Probabilidad del evento
1	1 a tierra, 2 y 3 conectados	$U1 \cdot (1-U2) \cdot (1-U3)$
2	2 a tierra, 1 y 3 conectados	$U2 \cdot (1-U1) \cdot (1-U3)$
3	3 a tierra, 1 y 2 conectados	$U3 \cdot (1-U1) \cdot (1-U2)$
4	1 y 2 a tierra, 3 conectado	$U1 \cdot U2 \cdot (1-U3)$
5	1 y 3 a tierra, 2 conectado	$U1 \cdot U3 \cdot (1-U2)$
6	2 y 3 a tierra, 1 conectado	$U2 \cdot U3 \cdot (1-U1)$
7	Todos a tierra	$U1 \cdot U2 \cdot U3$
8	Todos conectados	$(1-U1) \cdot (1-U2) \cdot (1-U3)$

TABLA 1: PROBABILIDAD DE EVENTO

Se supone que los valores de no disponibilidad de los tres componentes se han calculado y son $U1$, $U2$, $U3$ y. La tabla de probabilidad de evento se construye como se muestra en la tabla. Las probabilidades de fallo acumulativo para cada nivel de fallo se pueden calcular a partir de la tabla.

La probabilidad de fallo de cualquiera de los componentes es

$$P(a) = U1 \cdot (1 - U2) \cdot (1 - U3) + U2 \cdot (1 - U1) \cdot (1 - U3) + U3 \cdot (1 - U1) \cdot (1 - U2)$$

La probabilidad de que cualquiera de los dos fallos de los componentes es:



$$P(B) = U1 \cdot U2 \cdot (1 - U3) + U1 \cdot U3 \cdot (1 - U2) + U2 \cdot U3 \cdot (1 - U1)$$

La probabilidad de que los tres fallos de los componentes es:

$$P(C) = U1 \cdot U2 \cdot U3$$

El análisis de equipos de repuesto puede llevarse a cabo si se tiene en cuenta un criterio de fallo del sistema. Por ejemplo, si el criterio de fallo del sistema de este caso es que cualquier fallo de uno o más componentes da como resultado el fallo del grupo, el análisis de piezas de equipo se muestra en la Tabla 2. Tenga en cuenta que los valores de fiabilidad en la columna "Valor de ejemplo" son arbitrariamente dados aquí sólo para fines de explicación. Si se especifica un nivel de fiabilidad aceptable del grupo, el número de piezas de repuesto se puede determinar. Por ejemplo, si el nivel de fiabilidad aceptable del grupo es 0,9, se necesita el primer repuesto. Si se selecciona el nivel aceptable como 0,98, también se necesita la segunda.

Análisis de equipos de repuesto basado en un criterio de fiabilidad			
Repuestos	Fiabilidad de grupo	Valor de ejemplo	Contribución del repuesto
Cero	$1,0 - [P(a) + P(b) + P(c)]$	0,85	
Primero	$1,0 - [P(b) + P(c)]$	0,95	0,10
Segundo	$1,0 - [P(c)]$	0,99	0,04
Tercero	1,0	1,00	0,01

TABLA 2: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE EQUIPOS DE REPUESTO BASADOS EN UN CRITERIO DE FIABILIDAD

3.2.4 Paso 3: Realización del análisis de piezas de equipos en base a un criterio de fiabilidad determinado o un modelo de costos probabilístico.

La especificación de un nivel de fiabilidad aceptable del grupo es una tarea difícil en aplicaciones reales. El análisis de costo probabilístico proporciona una manera más amplia para justificar o no justificar los repuestos. El análisis se basa en la comparación entre la reducción del coste del fallo del grupo debido a los repuestos y el coste de inversión de los repuestos.

Para ello el autor, propone un “Modelo del Coste de Fallo” en función de los costes de fallos esperados (CFE) para los casos con y sin repuestos se calculan del siguiente modo respectivamente. El autor propone la siguiente fórmula:

$$CFE = \sum_{i=1}^M C_i P_i \cdot t_c$$
$$CFE = \sum_{i=1}^{M_1} C_i P_i \cdot t_c + \sum_{i=1}^{M_2} C_i P_i \cdot t_d$$

Donde C_i es el costo promedio de fallo por hora para el estado de fallo i . P_i es la probabilidad del estado i y puede ser obtenida en la simulación de Monte Carlo o estado de enumeración. t_c es la duración total (en horas) en la que los costes de fallos pueden tener lugar. t_d es el tiempo de instalación de los repuestos. M es el número total de estados de fallo. M_1 es el número de los estados de insuficiencia en la que el número de componentes que han fallado excede las piezas de repuesto disponibles. M_2 es el número de los estados de fallo en el que los componentes que han fallado son iguales o menores que los repuestos disponibles. En los estados de insuficiencia representados por M_2 , el costo de falla es debido al hecho de que la instalación de piezas de repuesto



requiere tiempo. Normalmente, la contribución del segundo término de la segunda ecuación es mucho más pequeña que el de la primera. En el caso de las piezas de repuesto en línea, tales como los reactores conmutables o condensadores en los sistemas de transmisión, el tiempo de instalación es cero. En este caso, solamente se necesita el primer término.

Los costes de fallos para los casos de repuesto cero, uno de repuesto, dos de repuesto, y así sucesivamente se calculan primero. Cabe señalar que de acuerdo con la definición, $M1$ y $M2$ son variados dependiendo de los casos de repuesto. Generalmente, el cálculo se repite para cada uno de todos los años considerados en la planificación de repuesto. Debe también apreciarse que P_i es diferente para cada año debido a la falta de disponibilidad de los componentes debido al envejecimiento el modo de fallo se incrementa con la edad. Por otro lado, se calcula la estimación del coste unitario de fallo, de base temporal (horas) de la que resulta un tiempo determinado. El coste de fallo por hora C_i es un valor promedio a lo largo de la duración de t_c . El coste de fallo es generalmente causado por la pérdida de cargas en sistemas de energía. Una situación común en la planificación de equipos de repuesto es que la pérdida de cargas debidas a la falta de piezas de repuesto puede ser sólo asociada a una reducción en el ingreso a la utilidad. En este caso, el coste de fallo por hora es igual a la pérdida de cargas (en megavatios) por la tasa de la electricidad ($\$/MW \cdot h$). La pérdida de carga depende del tiempo, mientras que la tarifa eléctrica puede o no ser variado en el tiempo dado. La tarifa eléctrica es básicamente un precio fijo para los clientes nativos dentro de una utilidad y un valor variado de tiempo para las transacciones entre empresas de servicios públicos.

En el caso de la tarifa de electricidad fija, el costo promedio de fallo por hora es el producto de la tarifa eléctrica fija y la pérdida promedio de cargas sobre la duración:

$$C_i = \frac{R}{N} \sum_{k=1}^N S_k$$

Donde R es la tasa fija de electricidad, S_k la pérdida de carga en la k hora, y N el número de horas durante t_c .

En el caso del precio de la energía variable en el tiempo, el coste promedio por hora de fallo se puede calcular utilizando el siguiente punto de vista. Tanto la pérdida de carga S y energía precio R son tratados como variables aleatorias. Sus experimentales distribuciones de probabilidad discretas se pueden obtener a través de las estadísticas por hora de los últimos años y se expresan como un conjunto de valores de la muestra, cada uno con una probabilidad:

$$p(S = s_j) = p_{sj} \quad (j = 1, \dots, ns)$$

$$p(R = r_k) = p_{rk} \quad (k = 1, \dots, nr)$$

Donde s_j , p_{sj} y ns son los valores de la muestra, las probabilidades de cada valor, y el número de muestras para la variable S ; r_k , p_{rk} , y nr son los valores de la muestra, las probabilidades de cada valor, y el número de muestras para la variable R . En la preparación de las curvas estadísticas de S y R , los valores horarios pueden ser divididos en grupos de acuerdo a sus magnitudes, utilizando una longitud dada segmentaria, y s_j o r_k como el promedio de los valores por hora en un grupo. Mientras la longitud segmentaria es lo suficientemente pequeña, las distribuciones de probabilidad discretas tienen una precisión suficiente.

El costo medio de fallo por hora está dado por:

$$C_i = \sum_{j=1}^{ns} \sum_{k=1}^{nr} s_j r_k p_{sj} p_{rk}$$

Matemáticamente, la C_i de la ecuación es la expectativa del producto de las dos variables aleatorias S y R , que se calcula como la suma de los productos de cada par de s_j y r_k ponderados por sus probabilidades de ocurrencia.



El modelo de costes de inversión anual, está asociado a las inversiones de capital que se traducen en el costo del análisis de coste/beneficio del repuesto. El coste de fallo por hora C_i es un valor promedio a lo largo de la duración de t_c . El coste de fallo es generalmente causado por la pérdida de cargas en sistemas de energía. Una situación común en la planificación de equipos de repuesto es que la pérdida de cargas debidas a la falta de piezas de repuesto puede ser sólo asociada a una reducción en el ingreso a la utilidad. En este caso, el coste de fallo por hora es igual a la pérdida de cargas (en megavatios) por la tasa de la electricidad ($\$/\text{MW} \cdot \text{h}$). La pérdida de carga depende del tiempo, mientras que la tarifa eléctrica puede o no ser variado en el tiempo dado. La tarifa eléctrica es básicamente un precio fijo para los clientes nativos dentro de una utilidad y un valor variado de tiempo para las transacciones entre empresas de servicios públicos.

En el caso de la tarifa de electricidad fija, el costo promedio de fallo por hora es el producto de la tarifa eléctrica fija y la pérdida promedio de cargas sobre la duración:

$$C_i = \frac{R}{N} \sum_{k=1}^N S_k$$

Donde R es la tasa fija de electricidad, S_k la pérdida de carga en la k hora, y N el número de horas durante t_c .

En el caso del precio de la energía variable en el tiempo, el coste promedio por hora de fallo se puede calcular utilizando el siguiente punto de vista. Tanto la pérdida de carga S y energía precio R son tratados como variables aleatorias. Sus experimentales distribuciones de probabilidad discretas se pueden obtener a través de las estadísticas por hora de los últimos años y se expresan como un conjunto de valores de la muestra, cada uno con una probabilidad:

$$p(S = s_j) = p_{sj} \quad (j = 1, \dots, ns)$$

$$p(R = r_k) = p_{rk} \quad (k = 1, \dots, nr)$$

Donde s_j , p_{sj} y ns son los valores de la muestra, las probabilidades de cada valor, y el número de muestras para la variable S ; r_k , p_{rk} , y nr son los valores de la muestra, las probabilidades de cada valor, y el número de muestras para la variable R . En la preparación de las curvas estadísticas de S y R , los valores horarios pueden ser divididos en grupos de acuerdo a sus magnitudes, utilizando una longitud dada segmentaria, y s_j o r_k como el promedio de los valores por hora en un grupo. Mientras la longitud segmentaria es lo suficientemente pequeña, las distribuciones de probabilidad discretas tienen una precisión suficiente.

El costo medio de fallo por hora está dado por:

$$C_i = \sum_{j=1}^{ns} \sum_{k=1}^{nr} s_j r_k p_{sj} p_{rk}$$

Matemáticamente, la C_i de la ecuación es la expectativa del producto de las dos variables aleatorias S y R , que se calcula como la suma de los productos de cada par de s_j y r_k ponderados por sus probabilidades de ocurrencia. Por último el valor actual de los repuestos que refleja las reducciones en los costes de fallos debido a los repuestos y las inversiones anuales equivalentes para las piezas de repuesto calculadas de forma anual generando dos flujos de efectivo. El enfoque del valor actual se utiliza para convertir los flujos de efectivo en los valores actuales y el análisis de coste / beneficio se puede realizar. El valor actual:

$$PV = \sum_{j=1}^m \frac{A_j}{(1+i)^{j-1}}$$

Donde, PV es el valor actual (Present value), A_j coste anual de fallo o inversión anual equivalente en el año j , i la tasa de descuento, y m el número de años considerados en la planificación de piezas de equipo.

El procedimiento para el análisis de piezas de equipo se resume como sigue:



Calcular la falta de disponibilidad de todos los componentes de un grupo de equipos para todos los años considerados.

Llevar a cabo el análisis de piezas de los equipos que utilizan el método de criterio de fiabilidad.

- Calcular los costes de fallo para repuesto cero, repuesto uno, repuesto dos, y todos los casos utilizando los modelos que figuran anteriormente y crear una tabla de las reducciones de costes de fallo debido a los repuestos para todos los años en la planificación de piezas de equipo.
- Calcular el coste anual de capital de un repuesto. Si el costo de capital es inferior a la reducción de costes fallo debido a un repuesto en un año en particular, el repuesto uno es considerado para ese año. El número y el momento de las piezas de repuesto están marcados en la tabla de reducción de costo de fallo.
- Calcular los dos flujos de efectivo de la inversión y la reducción de costes fallo debido a las piezas de repuesto.
- Calcular los valores actuales de los dos flujos y llevar a cabo el análisis de costo / beneficio.

3.2.5 Paso 4: Repetir los pasos 1 a 3 para todos los años en consideración.

Para tener una visión más objetiva, de deben repetir los pasos anteriores tantas veces como años se consideren.



3.3 MODELO 3: ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

3.3.1 El problema

El siguiente modelo [9] da, en términos de densidad probabilística de fallo, la tasa de fallo y la probabilidad de fallo de los componentes eléctricos representativos en el sistema eléctrico, como conductores, cables, transformadores e interruptores automáticos. Para ello, tiene en cuenta en su estudio la relación entre la vida, el estrés eléctrico, tensión mecánica y temperatura, así como sus efectos sobre los procesos de envejecimiento y de fiabilidad de los componentes eléctricos de un sistema eléctrico.

El documento, desarrollado en Alemania, también recurrirá a datos histórico de eventos de fallo, así el método es capaz de evaluar la vida útil y la fiabilidad de los componentes eléctricos con datos razonables y exactos.

3.3.2 El método

En el mercado liberalizado, la gestión de activos optimizado debe considerar la fiabilidad del suministro y otros aspectos de la calidad de energía, así como la reducción de costes de mantenimiento y de capital. El objetivo clave es encontrar un equilibrio aceptable entre la rentabilidad y la calidad del suministro.

A menudo se asume que la vida útil de los equipos eléctricos instalada es menor de 40 años. Para llegar a la edad moderada de los equipos eléctricos se tiene que tener en cuenta la reinversión de mantenimiento y la sustitución. La vida útil de 40 años para el equipo eléctrico implica una proporción anual de la reinversión total en torno al 2,5 %. Sin embargo, en muchas empresas, los gastos anuales de mantenimiento y reemplazo son sólo del 1%, lo que corresponde a un tiempo de vida esperado de 100 años para que el equipo eléctrico. Debido a las reinversiones limitadas, la edad de los equipos eléctricos se incrementará. Las tasas de fallo estadísticas se elevan durante los años de



acuerdo con la curva de la bañera bien conocida, ver Figura 3. Pasados los 15 y 35 años de funcionamiento, las tasas de fallo ascienden a 0.375 por kilómetro y año, y 0,0375 por año para un tipo de un cable con aislamiento XLPE (Polietileno reticulado) y una clase de transformador de potencia, respectivamente. **Es indiscutible que la edad de los equipos eléctricos pone en peligro la seguridad y la fiabilidad de las redes.**

El enfoque tradicional, para hacer frente a la evaluación de la vida se basa en el análisis de las "peores condiciones" y en el uso de los "factores de seguridad". El enfoque representa la experiencia pasada en hechos individuales o numerosos, sin asignar un grado de probabilidad a la expectativa futura. Por lo tanto el enfoque no proporcionaba modelos analíticos perdurables.

Una forma alternativa de incorporar la experiencia pasada es identificar todos los eventos que han contribuido a que la experiencia asociada a un grado comparativo de la probabilidad de las expectativas futuras. La aplicación de un análisis especial se lleva a cabo sobre la base del enfoque probabilístico. Las curvas ajustadas son sólo una simulación matemática que no se refiere a ninguna información acerca de los parámetros técnicos de los aparatos eléctricos y las condiciones de funcionamiento de las redes, por lo que no pueden dar una comprensión completa de las implicaciones físicas de fallos.

Los fenómenos de envejecimiento y los procesos de envejecimiento de los materiales aislantes típicos se han estudiado bajo pruebas o condiciones de trabajo. Sin embargo, los datos experimentales sólo pueden describir escasas e incompletas comportamientos de envejecimiento de los componentes eléctricos en las redes de distribución. Por lo tanto, **un nuevo enfoque no sólo debe reflejar y responder a la forma en que los equipos eléctricos fallan, sino también deducir las consecuencias de los fallos mediante la conexión de los datos estadísticos con los modelos de evaluación duraderos.** Una vez que las futuras distribuciones de fallo se introducen a través de diferentes tipos de equipos, condiciones de servicio y estructuras de red, **los resultados**



obtenidos contribuirán a un electro-termo-mecánico modelo de vida completo de los componentes eléctricos.

Junto con la simulación de Monte Carlo[8] secuencial en el tiempo, los modelos pertinentes de la fiabilidad de los equipos eléctricos dependen del pronóstico probabilístico de datos de fallo y de las características de envejecimiento de los equipos eléctricos, que permiten calcular las consecuencias de los fallos en términos de probabilidad de fallo, tasa de fallo, el fallo de densidad probabilística, la fiabilidad del sistema, etc. Sobre la base de las condiciones técnicas de operación de las redes conductas de fallo de los equipos eléctricos, la gestión de la vida según el intervalo de mantenimiento y sustitución pueden decidir qué nivel de riesgo en los costos deterministas es aceptable.

3.3.2.1 Envejecimiento mecánico de los componentes eléctricos

Para modelar una red de distribución, toda la red de distribución se puede dividir en cuatro componentes eléctricos principales: líneas aéreas, sistema de cableado, subestaciones secundarias y estaciones de distribución de media tensión (seccionadores aislados en gas y seccionadores blindados incluyendo aislante, la protección y el control local). Para cambiar los componentes eléctricos en el estado no perturbado o alterado, las estaciones de conmutación están equipadas con interruptores automáticos, seccionadores, protecciones y controles locales. Así, mientras que el gran número de instalaciones eléctricas en las redes de distribución aumente el modelo probabilístico promete buenos resultados.

De acuerdo con la curva de la bañera de la tasa de fallo, el tipo de fallo se caracteriza por:

- 1) Fallo prematuro (teething failure). El fallo de prematuro se crea normalmente en el proceso de fabricación. Generalmente se elimina por pruebas rutinarias o reparaciones in situ durante el período inicial de funcionamiento. No tiene ninguna influencia sobre la acción a largo plazo de los componentes eléctricos.

- 2) Fallo al azar (random failure). El fallo al azar suele estar causado por influencias externas (por ejemplo, trabajos de excavación o tormenta) es un fallo principal de los componentes eléctricos. Este tipo de fallo es casi independiente del envejecimiento de los componentes eléctricos, por lo que las probabilidades de que su aparición se supone que es constante durante toda la vida útil de los componentes eléctricos, mientras que las tasas de fallo se pueden derivar de las estadísticas de fallas.
- 3) Fallo por envejecimiento (aging failure). El fallo de envejecimiento, lo que es provocado por la disminución de la fuerza eléctrica o mecánica, está fuertemente correlacionado con el envejecimiento de los componentes eléctricos y las tasas de fallo no son constantes para toda la vida. Es importante tener en cuenta que los fallos por envejecimiento se traducen en un aumento de la tasa de fallo, e indica que el envejecimiento se vuelve crítico y los componentes eléctricos no son suficientemente fiables.

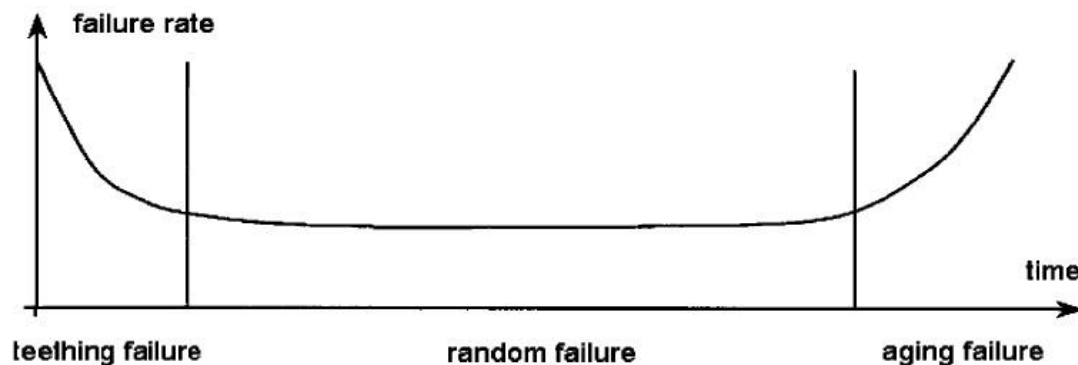


FIGURA 3: CURVA DE LA BAÑERA

Como resultado de la estadística de fallo, las ubicaciones de fallo y las causas de éste en las redes de distribución se presentan en la siguiente tabla, Tabla 3, obtenida gracias a “Asset management in distribution systems considering new knowledge on component



reliability and damage costs” [10]. En ella se observa cómo conductores, cables, transformadores e interruptores adquieren las probabilidades de fallo de 67 %, 66 %, 19 %, y 36 %, respectivamente, en sus propios sistemas de componentes: líneas aéreas, sistemas de cableado, subestaciones secundarias y estaciones de conmutación. El resto de estos porcentajes están asociados a otras causas, por ejemplo, en sistemas de cableado, la probabilidad de fallo restante, 34 %, es causado por los empalmes de cables y terminaciones.

Estadísticas de fallo

Componentes Eléctricos	Localización del Fallo	Fallo al Azar	Fallo por envejecimiento
Líneas aéreas	Conductor (67%)	90%	10%
Sistema de cableado	Cable (66%)	40%	60%
Subestación secundaria	Transformadores (19%)	30%	70%
Estación de conmutación	Interruptor (36%)	10%	90%

TABLA 3: ESTADÍSTICAS DE FALLO PARA CADA COMPONENTE ELÉCTRICO DEL SISTEMA

A. Sistema de cableado

Dos tercios (66%) de los fallos en los sistemas de cable ocurren en los cables. Los cables están dañados por la disminución de la resistencia eléctrica. Además, los cables son a menudo dañados por efectos externos.

En los cables de media tensión, el desarrollo de la arborescencia acuosa (o árbol de agua) (penetración de humedad en el material aislante) es un fenómeno importante en la degradación. Al comienzo de un árbol de agua, la resistencia del aislamiento de los cables todavía resiste la tensión de funcionamiento, por lo que no ocurre un fallo de inmediato. Cuando una corriente empieza a fluir, el árbol del agua puede cambiar por fin en un árbol eléctrico y la rigidez dieléctrica



disminuye rápidamente. En presencia de agua, la corrosión de cintas de refuerzo y el cambio en la estructura cristalina de los cables son los factores de envejecimiento dominantes. El crecimiento de los árboles y el envejecimiento del material sólido sigue el modelo de potencia inversa.

El proceso de envejecimiento de la mayoría de materiales aislantes se acelera cuando se aumenta la temperatura de los materiales.

B. Subestaciones secundarias

Los transformadores en subestaciones secundarias se ven afectados por la disminución de la fuerza eléctrica o mecánica. El envejecimiento de los transformadores está relacionado con el envejecimiento de los bobinados, tanques, bujes o en cambiadores de tomas en carga. El envejecimiento de devanados depende fuertemente de la historia de funcionamiento de los transformadores, en particular en el estrés térmico debido a una sobrecarga. Los tanques se ven afectados por la corrosión que está relacionada con el tiempo de funcionamiento y el historial de mantenimiento. El envejecimiento de los bujes debido a la tensión térmica depende de la carga de funcionamiento de los transformadores.

En los transformadores impregnados de aceite, se debe prestar mucha atención a la condición de diagnóstico de los materiales aislantes de celulosa (papel y cartón prensado).

Al igual que otros materiales aislantes sólidos y líquidos, las características de la vida de los transformadores pueden ser bien descritas por el modelo de potencia inversa y el modelo de Arrhenius [11].

C. Estaciones de Conmutación.

Los conmutadores aislados en gas y los blindados, han demostrado una alta fiabilidad durante más de 20 años. Esta alta fiabilidad se atribuye a la



encapsulación de componentes eléctricos y el uso de excelentes aislantes hechas de resina epoxi y de los gases aislantes. Para el desarrollo del modelo de la vida, se revisan los mecanismos de envejecimiento de los gases de aislamiento y de aislantes sólidos utilizados en dispositivos de distribución con aislamiento de gas. Una partícula conductora en contacto con la superficie de los aislantes puede generar una descarga parcial si se encuentra en una posición con alta tensión eléctrica. Si la tensión eléctrica continúa durante un largo periodo de tiempo, los productos de descomposición causados por la descarga parcial degradan la superficie de los aisladores y conducen a una descarga. Algunos deterioros de los gases aislantes coinciden con estos trastornos si se producen. Cuando las partículas conductoras están presentes en dispositivos de distribución con aislamiento de gas, la rigidez dieléctrica de los gases de aislamiento y de los aislantes de sólidos tiende a disminuir con el tiempo si se les aplica un voltaje. A esto se le denomina: característica tensión-tiempo de los gases aislante.

Independientemente de la probabilidad de fallo del 36%, los interruptores automáticos provocan las fallas más frecuentes en las estaciones de conmutación, por lo que son muy relevantes para la inspección. La disminución de la resistencia mecánica es la principal causa de fallos en absoluto. Los conmutadores se envejecen normalmente debido al desgaste a cabo procesos tales como la fatiga del material bajo carga cíclica. Esto puede ocurrir cuando una vibración normal provoca un fallo o puede ocurrir durante condiciones más severas de fallos.

El principal problema del envejecimiento de los sistemas de protección y control con componentes electro-mecánicos en estado sólido de provienen de las propiedades de deterioro que se producen al final de su vida.

D. Líneas aéreas.

Los fallos de las líneas aéreas se producen con frecuencia en los conductores. Debido a que los conductores están expuestos al medio ambiente, es decir, por la

influencia atmosférica o la vegetación. Este último puede ser disminuido por mantenimiento.

La corrosión es la consecuencia más negativa de la vejez para conductores de líneas aéreas. La cantidad de corrosión depende principalmente de las condiciones ambientales por el viento, el hielo o el tiempo. Las influencias de la tensión mecánica y la temperatura en los conductores pueden ser descritas por el modelo de la potencia inversa, y por el modelo de Arrhenius [11].

Las principales razones para el fracaso de las líneas aéreas son accidentes estocásticos, por tanto, en la mayoría de los casos, las probabilidades de su aparición se asumen constantes.

3.3.2.2 Modelos de los componentes eléctricos

Como ya se dijo anteriormente, el envejecimiento de los materiales de aislamiento en componentes eléctricos a menudo contribuyen al fracaso debido a la presencia de tensiones de degradación tales como eléctrica, térmica, mecánica y ambiental. Los procesos de envejecimiento típicos de materiales aislantes, la formación de árboles de agua, procesos termoquímicos y procesos de desgaste que pueden generar descargas parciales.

El modelo de la vida L de los componentes eléctricos en la presencia de la tensión eléctrica o mecánica S puede demostrar siguiendo la ley de la potencia inversa:

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-n}$$

Donde n es el coeficiente de esfuerzo-resistencia, S_0 el parámetro de escala para el límite inferior de la tensión (por debajo del cual el envejecimiento puede ser despreciado) y L_0 es el tiempo de vida correspondiente.

Cuando la tensión térmica, debido a un sobrecalentamiento de materiales aislantes, se aplica a un componente eléctrico bajo la acción simultánea de las tensiones eléctricas y mecánicas, nos encontramos en un modelo de vida electro-termo-mecánico. El componente eléctrico se puede establecer de acuerdo con el modelo de Arrhenius [11].

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-n} \cdot e^{-BT} \quad T = \frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta}$$

Donde B es proporcional a la energía de activación de la reacción de degradación térmica principal, T es la tensión térmica convencional, ϑ es la temperatura absoluta y ϑ_0 es una temperatura de referencia.

El modelo de la vida electro-termo-mecánica propuesto se deriva de una combinación adecuada de los modelos de estrés (por ejemplo, el modelo de potencia inversa y el modelo de Arrhenius [11]). Esto se puede hacer simplemente suponiendo que la tasa de envejecimiento bajo estos esfuerzos combinados es el producto de las tasas de envejecimiento en cada solo tensión.

Como ya se ha observado, el modelo de vida multi-tensión combinada dará lugar a una sobreestimación de la sinergia entre las tensiones que lleva a una subestimación de la vida, especialmente a altas tensiones. Por lo tanto, parece razonable establecer una función correctiva adecuada $\left(\frac{S}{S_0} \right)^{bT}$ (b es un coeficiente correctivo que tiene en cuenta la reacción del material debido a la aplicación de estrés combinado) con el fin de tener en cuenta las interacciones entre el estrés térmico, eléctrico, o mecánico y para lograr un mejor ajuste de los datos experimentales. En este caso, la siguiente expresión se ha asumido para:

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-(n-bT)} \cdot e^{-BT}$$



Los modelos están caracterizados por tres parámetros (n , b y B) que proporcionan el tiempo de vida de un componente. En el caso de los esfuerzos combinados, el tiempo de vida en tres dimensiones puede ofrecer las líneas de vida eléctricos o mecánicos en las líneas de vida $T=0$ o térmicas $S-S_0=0$ que siguen el modelo de potencia inversa o el modelo de Arrhenius[11].

El tratamiento estadístico de los datos de prueba de envejecimiento es un tema fundamental en la evaluación del material en cuanto a la resistencia a las tensiones individuales o múltiples. En cuanto al envejecimiento de los materiales aislantes sometidos a tensiones eléctricas, mecánicas y térmicas combinadas, la función Weibull generalmente se utiliza para tratar el tiempo de fallo obtenida a partir de ensayos de envejecimiento. Su función de probabilidad genérica es:

$$F(x; k, \gamma) = 1 - e^{-(x/\lambda)^k}$$

Donde $x \geq 0$, siendo nula cuando $x < 0$.

El parámetro de escala, λ , indica en base a qué se comparará la entrada, y α que es el parámetro de forma, que como se puede observar en el gráfico siguiente, modificará la curvatura de la función permitiendo un crecimiento más o menos pronunciado.

Esta función se encuentra acotada entre 0 (probabilidad nula) y 1 (probabilidad segura).

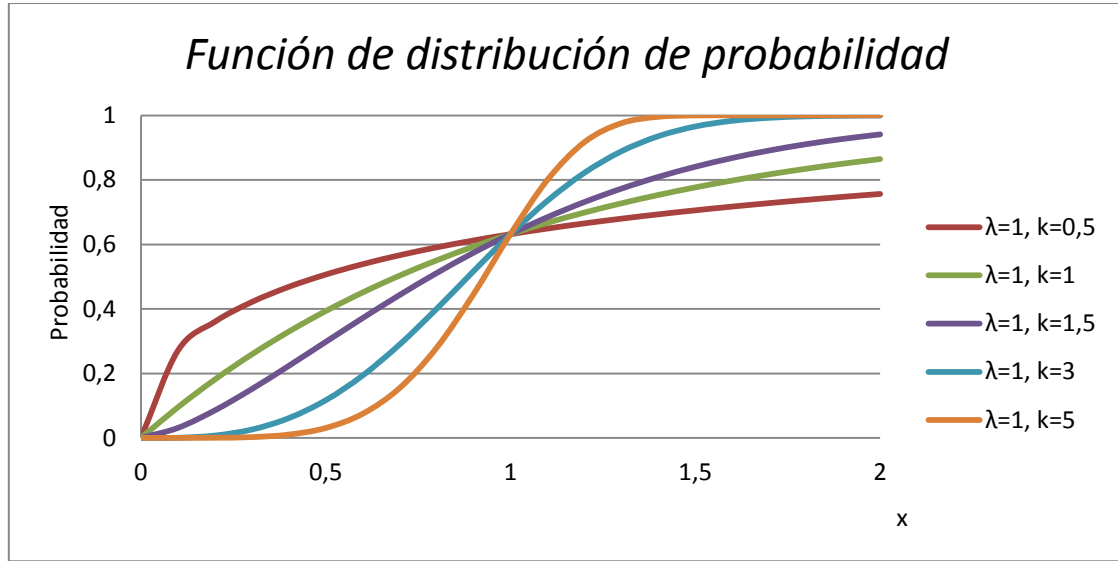


FIGURA 4: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN PROBABILIDAD DE WEIBULL

Por lo tanto, un modelo estadístico aceptado de la determinación de la probabilidad de fallo P a tensiones dadas se compara con un parámetro de forma α y puede ser descrito por:

$$P(t > L) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{L_{63\%}} \right)^\alpha \right]$$

Se supondrá que los fallos se producirán inmediatamente, siempre y cuando la variable sea mayor que el tiempo de vida L de los componentes eléctricos. Por lo tanto, los efectos del fallo pueden ser generalmente descritos por la variable continua en lugar de por el tiempo de vida no continua L . Puesto que $L_{63\%}$ es el tiempo de fallo para la probabilidad de fallo de 63 % (ver gráfica) como una función de las variables S y T , puede explicarse y sustituirse por el modelo de vida adecuado:

$$P(t > L) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{S}{S_0} \right)^{\alpha(n-bT)} \cdot \left(\frac{t}{L_0} \right)^\alpha \cdot e^{\alpha BT} \right]$$



Se puede producir un fallo si se aplica un exceso de tensión o si el componente eléctrico envejece por la temperatura o el tiempo. De esta manera, la ecuación proporciona los percentiles de fallo para cada par de tensiones.

Hay que mencionar que los datos estadísticos de fallo de la tabla anteriormente mencionada se han recogido de una tal manera que las diversas causas de fallo se remontan a la consecuencia el fallo, la ubicación fallo y su ocurrencia. Por ejemplo, el fallo de los cables es causado por un fallo aleatorio de 40 % y de un fallo de envejecimiento de 60 %. Por lo tanto, la probabilidad de fallo resultante de los componentes eléctricos se deriva de cada par de estas causas de fallos elementales e independientes. La probabilidad total de fallo P_m de las m causas de fallo se puede obtener con la simple mezcla de las probabilidades de fallo P_i para $i=1, 2, 3, \dots, m$, correspondientes a cada causa de fallo:

$$P_m = \sum_{i=1}^m a_i \cdot P_i \quad \sum_{i=1}^m a_i = 1$$

Donde a_i es el porcentaje de la i -ésima causa de fallo.

La densidad probabilística de fallo y la tasa de fallo se pueden determinar mediante la probabilidad de fallo:

$$f(t) = \frac{dP_m(t > L)}{dt}$$
$$H(t) = \frac{dP_m(t > L)}{[1 - P_m(t > L)] \cdot dt}$$

Para los componentes eléctricos, la densidad probabilística de fallo y la tasa de fallo son los criterios de evaluación más importantes, aparte del tiempo de fallo.



3.4 ELECCIÓN DEL MODELO

3.4.1 Modelo 1

El modelo de mantenimiento centrado en la fiabilidad ofrece una relación cuantitativa entre la fiabilidad del sistema (en función del riesgo de fallo de sus componentes críticos) y el esfuerzo de mantenimiento (costes), que da como resultado el coste efectivo de la estrategia de mantenimiento preventivo (cost effective preventive maintenance strategy). Los resultados de la aplicación de este modelo permiten comparar diferentes métodos de mantenimiento y a partir de este resultado, las distintas estrategias de mantenimiento preventivo disponibles.

Una de las ventajas y a su vez inconveniente de este modelo es que se ha construido a partir de datos reales (mayor fiabilidad) dentro de un contexto físico, económico y regulatorio bien determinado (lo que dificulta su extrapolación).

Una evaluación más detallada, en función de los objetivos de este proyecto, da el siguiente resultado:

Ventajas:

- Se trata de un modelo que se enfoca en localizar componentes críticos, que afectan a la fiabilidad del sistema, como son buses, interruptores, cables subterráneos, transformadores, clasificados, a su vez, dependiendo de su nivel de voltaje, y los evalúa por separado; ofreciendo así una visión general y precisa del propio sistema.
- Ofrece como resultado una magnitud concreta, basada en relación cuantitativa entre la fiabilidad del sistema y el esfuerzo de mantenimiento. Esta magnitud puede utilizarse para evaluar tanto los distintos métodos o procedimientos de mantenimiento como la propia estrategia en su conjunto.

Inconvenientes:

- No especifica variables asociadas a cada componente, sino que se basa en un criterio de fiabilidad total de cada uno de ellos. Al no profundizar individualmente en cada componente, se desconoce qué condiciones internas o externas son las que se han tenido en cuenta para parametrizar y formular el modelo.
- Parte de unas medidas de entrada concretas relacionadas con un sistema y localización determinados, si bien están tomadas de forma sistemática en unas condiciones determinadas. El documento se basa en la realización de medidas terrenales en sistemas de distribución de potencia reales, en Suecia.

3.4.2 Modelo 2

El segundo modelo, “Análisis preventivo-probabilístico de equipos de repuesto” [7] no estudia directamente el análisis probabilístico del fallo de las líneas eléctricas. Se centra en la gestión de los equipos de repuesto, en relación con los costes de esta actividad dentro de la empresa y uno de los factores que considera dentro del modelo es el riesgo de fallo de los componentes del sistema eléctrico, basándose en el teorema de la probabilidad total.

Las ventajas que aporta este modelo son:

- El tipo análisis que se realiza de manera objetiva basándose en simulaciones matemáticas, lo que permite, al menos en teoría darle una gran portabilidad a distintos sistemas.
- Ofrece una precisa respuesta al usuario respecto de la política de reposición de equipos que es uno de los aspectos que puede incidir en la estrategia de mantenimiento de una empresa.

Del lado de los inconvenientes, pueden mencionarse:



- Está orientado fundamental a equipos o sistemas. Por ello, no considera el impacto de los componentes del sistema de forma aislada impidiendo la evaluación de la fiabilidad de éstos que constituye el núcleo del presente trabajo.
- El estudio tiene en cuenta la interconexión del sistema, para evaluar la probabilidad de fallo de este, no es objeto del presente trabajo, debido al nivel de complejidad y dificultad que produciría la inclusión de tales operaciones.

3.4.3 Modelo 3

El modelo de “Estimación del tiempo de vida de los componentes eléctricos de la red de distribución” [9] estudia la relación entre la vida, el estrés eléctrico, tensión mecánica y temperatura de los componentes eléctricos de una red de distribución, así como sus efectos sobre los procesos de envejecimiento y de fiabilidad. Este estudio divide la red de distribución en cuatro componentes eléctricos principales: líneas aéreas, sistema de cableado, subestaciones secundarias y estaciones de distribución de media tensión (seccionadores aislados en gas y seccionadores blindados incluyendo aislante, la protección y el control local). El objeto del modelo es encontrar un equilibrio aceptable entre la rentabilidad y la calidad del suministro.

En este caso, las ventajas que ofrece este modelo:

- Identifica las variables relevantes de cada componente del sistema de red de distribución, facilitando el estudio de las redes de distribución a partir de sus componentes.
- Es el único modelo que incluye como variable probabilística al tiempo, permitiendo considerar como factor influyente en el riesgo de fallo de un componente la antigüedad de este.
- También, es el único en ofrecer un modelo verdaderamente probabilístico y detallado, susceptible por ello de utilizarse como elemento de comprobación de las soluciones que se obtengan en este trabajo.



Inconvenientes

- No especifica el peso o probabilidad de fallo que tienen cada una de las variables aplicadas a cada componente.
- Excluye el período de mantenimiento subsiguiente a la instalación por entender que existe una gran dependencia respecto de la calidad de fabricación del componente.

3.4.4 Selección del modelo de referencia.

La objetivo del presente trabajo es formular un modelo probabilística de mantenimiento de las líneas de redes de distribución. El modelo se planeará en función de los siguientes presupuestos:

a) **El objeto** cuya fiabilidad se analiza son **las líneas de una red distribución eléctrica**. Por lo tanto no se considerarán otros componentes como transformadores, interruptores, etc.; tampoco se consideran operaciones correspondientes a la red en su conjunto (interconexión, mercado o regulación).

b) **Las variables a considerar serán solamente las endógenas** (por ejemplo, aislamiento, temperatura del conductor, etc.). Es decir, no se analizan las exógenas (como vegetación, nivel de humedad, etc.) por la diversidad que estas variables pueden provocar.

c) Se pretende que **el modelo dependa de variables específicas** de forma que pueda ser aplicado en la práctica del mantenimiento, así como constituir una base para futuras ampliaciones de las variables a considerar. Por ello, los modelos de referencia deberán ser aquéllos que permitan la identificación de dichas variables así como la posibilidad de comparar sus resultados.

Bajo los criterios del presente proyecto, anteriormente descritos, el Modelo 1 será descartado, porque aunque indica qué componentes de un sistema se consideran críticos,



no especifica qué variables se asocian a cada componente eléctrico, lo que no permite conocer qué subcomponentes o características son consideradas de alta probabilidad de fallo. Además, el modelo se ha descrito en base a unas entradas específicas, lo que puede generar una distorsión en el resultado si se extrapola el modelo bajo otras condiciones distintas.

El segundo modelo, no se utilizará como referencia debido a que al no tratarse en su totalidad de un estudio de los componentes del sistema eléctrico, la información sobre probabilidades de fallo de los componentes es muy reducida, lo que dificultaría el estudio del presente proyecto. Otro motivo de desechar este modelo, es que se basa en el supuesto de sistemas interconectados, lo que dificulta y genera mucha más complejidad a la hora de modelar un componente específico.

Por último, se seleccionará como modelo de referencia el Modelo 3, porque aunque no especifica detalladamente el peso asociado a cada componente del sistema eléctrico, si que explica de qué variables debiera depender cada uno de ellos, lo que facilitará en gran medida el presente estudio. También presenta un modelo verdaderamente probabilístico, de donde puede que sea posible que extraer más información de las variables consideradas, incluyendo también la salida (probabilidades) que ayudarán a comprobar y/o corregir el modelo propuesto en este trabajo.

3.5 AHP. PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

3.5.1 Introducción

La toma de decisión asociada a un problema complejo, con múltiples criterios, es una situación frecuente, tanto de la vida cotidiana como en innumerables situaciones operativas del ámbito económico, industrial, incluso político.



En la década de los 80, Thomas L. Saaty [12], para hacer abordable el problema de decisión, ya que el número de comparaciones entre n alternativas simultáneas, es $n(n-1)/0.5$, propuso jerarquizar los criterios de decisión de forma que las comparaciones sean aborables y organizando de forma lógica los criterios relacionados. El procedimiento fue llamado **Proceso Analítico Jerárquico** (*Analytic Hierarchy Process*, *AHP*).

Así, AHP, es considerada una técnica para la resolución de problemas multicriterio, de ámbito general que permite incorporar a la toma de decisión aspectos tangibles e intangibles, subjetivos y objetivos, estructurados según una jerarquía arbitraria de criterios de decisión. En el vértice de la jerarquía se encuentra el objetivo principal del problema (*goal*), en las hojas todas las alternativas/variables de decisión y en los nodos intermedios, los criterios que agrupan lógicamente las alternativas/variables de decisión.

El diseño de la jerarquía debe ser realizado por expertos en el problema de decisión que deben identificar las alternativas, las variables y su relación en la jerarquía.

La característica más destacable del modelo AHP, que basa en gran parte su popularidad de uso, consiste en la comparación simple, tomando sólo dos elementos (por tanto es muy fácil razonar sobre ellos) del mismo nivel jerárquico que permite determinar la importancia relativa (si se comparan criterios) o preferencia relativa (si se comparan alternativas) que tendrán en el cálculo del valor inmediatamente superior en la jerarquía. La escala numérica para expresar esa comparación está propuesta en el método y conduce a obtener pesos normalizados para el cálculo de criterio superior. La información que se obtiene, con las comparaciones pareadas, suele ser redundante y con diferente nivel de coherencia pero permite obtener una agregación lineal de las variables de decisión en cada nivel de la jerarquía, hasta la obtención del objetivo principal.

3.5.2 Teoría de AHP

3.5.2.1 Axiomas

Se han establecido un conjunto de axiomas en los que se basa AHP.

- Comparación recíproca: el experto debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la intensidad de sus preferencias. La intensidad satisface la condición recíproca: “Si A es x veces más preferido que B , entonces B es x^{-1} veces más preferido que A ”.
- Homogeneidad: “Las preferencias se representan por medio de una escala limitada”.
- Independencia: “Cuando se expresan preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas”.
- Expectativas: “Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa”.

3.5.2.2 Metodología

La metodología propuesta por Saaty, en su primera formulación consiste en:

1. Modelización:

Realización de un modelo jerárquico en el que se encuentran todos los elementos que se consideran relevante para la toma de decisión: actores, escenarios, factores, elementos e interdependencias. La jerarquía resultante debe ser completa, representativa, no redundante y minimalista. Su construcción es la parte más creativa del proceso de resolución, pudiendo aparecer posiciones enfrentadas entre los distintos participantes.

2. Valoración:

Incorporar las preferencias, gustos y deseos de los actores mediante los juicios incluidos en las denominadas matrices de comparaciones pareadas. Estas matrices cuadradas reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro respecto a un atributo o propiedad en común. En la práctica, de los dos



elementos comparados, se toma como referencia el que posee en menor medida o grado la característica en estudio y se da un valor numérico de las veces que “el mayor” incluye, recoge, domina o es más preferido que “el menor” respecto al atributo estudiado.

3. Priorización y síntesis:

Proporcionar las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema. Se entiende por prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles.

4. Análisis de sensibilidad:

Se suele hacer para examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios principales de un problema. Lo que se lleva a cabo es un cambio en la prioridad de ese criterio manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios, de tal manera que todos ellos, incluido el criterio alterado, al modificarse sigan sumando la unidad.

3.5.2.2.1 MODELADO Y VALORACIÓN

Se modela el problema de decisión en una jerarquía de criterios de decisión. En el nivel superior se encuentra el objetivo o meta (goal). El problema de decisión consiste en determinar la alternativa que mejor alcanza la meta.

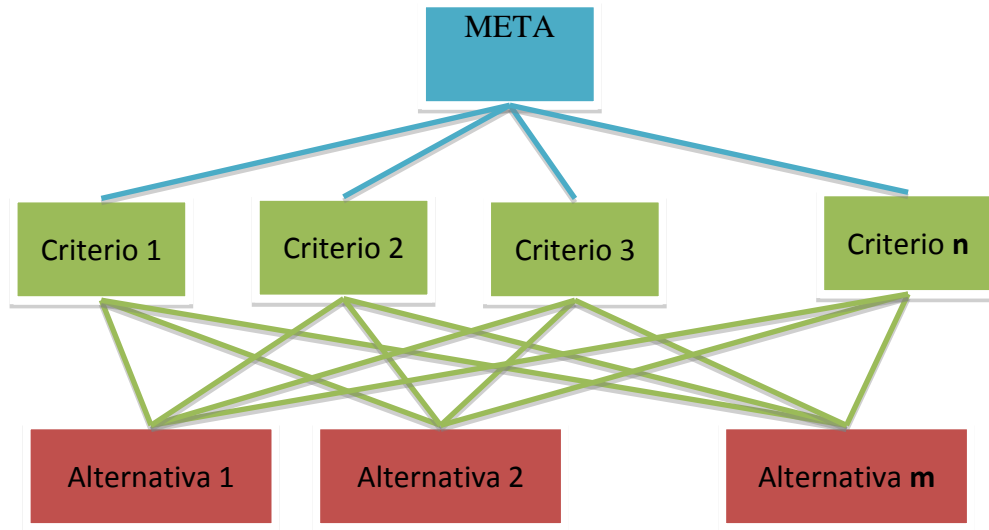


FIGURA 5: ESQUEMA DEL MODELO DE DECISIÓN EN UN AHP

En el nivel siguiente a la meta, se encuentran los criterios. Los criterios pueden ser atributos, objetivos, parámetros, cualquier elemento que permita distinguir alternativas. Es una etapa muy importante del proceso de toma de decisión la elección adecuada de los criterios y la relación que hay entre ellos para poder alcanzar la meta. La elección inadecuada de criterios puede conducir a no obtener buenos resultados.

Los criterios son dependientes del problema que se trata, no hay un conjunto general y su elección puede variar dependiendo del experto. Si hay algunas recomendaciones generales para la mejor elección de los criterios:

- Comprensibles y medibles: El valor debe ser adecuado para expresar el grado de cumplimiento del criterio, de forma clara y sencilla.
- Completitud: El conjunto de atributos indican el grado de cumplimiento de todos los objetivos con los que están involucrados.
- Operatividad: Los atributos deben tener sentido para el decisor, para poder entender como las variaciones sobre ellos afectan a la elección de las diferentes alternativas y permitir informar de ellos a otros expertos.
- Descomponibilidad: Deben permitir simplificar la toma de decisión permitiendo descomponer el problema general en subproblemas.

- No redundancia: Se debe evitar que un criterio se repita en la jerarquía, es decir, que tenga **diferentes consecuencias**.
- Minimalidad: El conjunto de atributos debe ser el menor posible, es decir, no debería existir un conjunto menor de atributos que pueden representar de forma completa el mismo problema.

Los criterios pueden descomponerse en subcriterios, definiendo una jerarquía descendiente. Con esta estrategia puede ganarse en una mejor conceptualización de los elementos involucrados lógicamente.

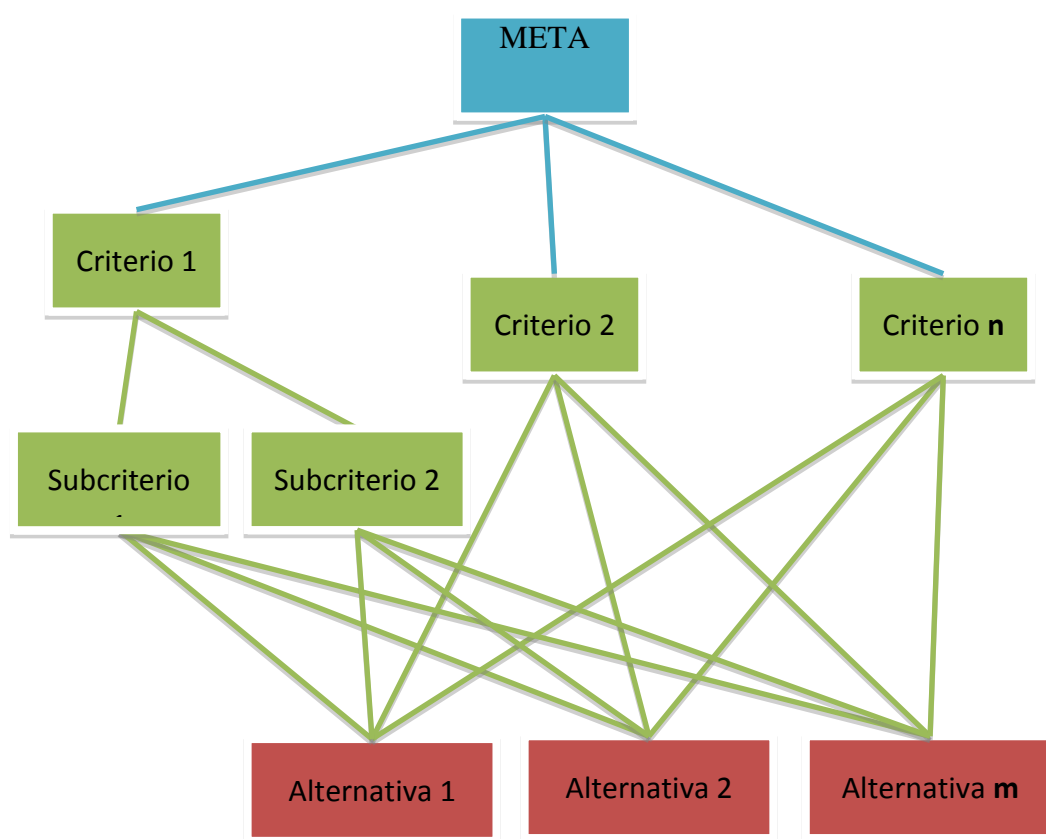


FIGURA 6: ESQUEMA DEL MODELO DE DECISIÓN EN UN AHP CON CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

3.5.2.2.2 PRIORIZACIÓN Y SÍNTESIS



Establecidos los criterios y subcriterios de la jerarquía, el siguiente paso consiste en determinar la relación entre ellos que permite calcular los niveles superiores hasta alcanzar el objetivo, esto es, definir una ponderación de la importancia relativa entre ellos.

Se consideran tres tipos de prioridades:

- Prioridades locales: Prioridades de los elementos que cuelgan de un nodo común.
- Prioridades globales: Prioridad respecto del objetivo global. Para calcularla es necesario multiplicar los pesos que se recorren en el camino desde el elemento hasta la meta.
- Prioridad final o total: Para una alternativa se calcula su prioridad final agregando todas las prioridades globales necesarias al recorrer el camino que une esa alternativa con la meta. El cálculo de agregación consiste en una suma ponderada.

En esta etapa, pueden intervenir uno o varios expertos que debe asignar un peso a cada criterio, realizando comparaciones binarias con todos los criterios y siguiendo una escala de peso relativo definida en modelo por Saaty.

3.5.2.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se trata de determinar el grado de sensibilidad del resultado con cambios que afectan a las prioridades de los criterios principales, modificando uno de ellos y alterando el resto de forma que en la modificación, sus ponderaciones sigan sumando 1.

3.5.2.2.4 ESCALA DE PRIORIDADES DE SAATY

Otra de las características más reconocibles del modelo AHP es la valoración relativa de los criterios de decisión mediante comparaciones binarias siguiendo una escala predefinida. Cada juicio binario, r_{ij} , es realizado por expertos en el problema multicriterio. Una comparación binaria involucra a dos elementos que se encuentran en el mismo nivel de la jerarquía y que tienen la misma consecuencia (mismo nodo superior en la jerarquía), siendo una medida de la prioridad relativa entre el criterio C_i y

C_j . La comparación debe considerar la propiedad del nodo superior exclusivamente, sin ser afectada por el resto de elementos de la estructura jerárquica. El valor de la comparación (peso entre los criterios) debe ser uno de la siguiente escala:

Importancia del criterio i frente al j , r_{ij}	Valor
Igual	1
Ligeramente mayor	3
Bastante mayor	5
Muchos mayor	7
Absolutamente mayor	9

TABLA 4: RESUMEN DEL VALOR ADJUDICADO A CADA NIVEL DE IMPORTANCIA PAREADO

La importancia recíproca, es decir la comparación entre el criterio C_j y C_i , el elemento de la matriz R de comparaciones pareadas, r_{ji} , es el inverso, $r_{ji}=1/ r_{ij}$, donde obviamente $r_{ii}=1$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

3.5.2.2.5 CÁLCULO DE PRIORIDADES

Si las prioridades de los criterios, w_i , fueran conocidas entonces la matriz de comparaciones pareadas sería:

$$W = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix}$$

Para determinar la importancia entre los criterios para obtener el objetivo, el vector de pesos (autovector) w_j , es necesario resolver la ecuación, $W\vec{w} = \mu\vec{w}$:

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix}$$

Todos los valores de la matriz, W , $w_{ij} = w_i / w_j$, son positivos. La matriz W tiene rango 1, y al ser todas las filas múltiplos de la primera, por tanto sólo tiene un autovalor, λ , distinto de cero.

Se observa que la suma de los elementos de una fila i es igual a $w_i \sum_{j=1}^n 1/w_j$ y la suma de los elementos para la columna j es $1/w_j \sum_{i=1}^n w_i$. Cada columna de la matriz es un múltiplo constante del autovector de ponderación, \vec{w} , por tanto se puede calcular normalizando cualquier columna de W .

Dado que los pesos no son conocidos y la matriz de comparación, R , se realiza con los juicios de los expertos, que no serán absolutamente consistentes, la matriz R puede considerarse una perturbación de la matriz W de la forma:

$$R\vec{w} = \lambda_{max}\vec{w}$$

Para la estimación del autovector, el vector de pesos, se proponen diferentes alternativas:

3.5.2.2.5.1 CÁLCULO DE VECTOR PROPIO DE SAATY

- Calcular la matriz normalizada de R , R^{norm} , dividiendo cada elemento de la j -ésima columna por la suma de todos los elementos de esa columna.

$$r_{ij}^{norm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$$

- Estimar el vector de pesos \vec{w} , calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada.

$$\vec{w} = [\vec{w}_1, \vec{w}_2, \dots, \vec{w}_n] \quad \text{donde} \quad \vec{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^{norm}$$

3.5.2.2.6 CÁLCULO DE CONSISTENCIA DE JUICIOS

Si la matriz R fuera completamente consistente, es decir cumple la condición, $r_{ik} \cdot r_{kj} = r_{ij}$, entonces el autovalor λ_{max} coincidiría con n . Es claro que es muy difícil que un experto pueda ser completamente consistente y se convierte en imposible cuando son varios expertos los que promediando sus juicios completan la matriz de comparación. Por tanto es necesario utilizar una medida que pueda juzgar el grado de consistencia de los juicios emitidos con el fin de determinar si estos deben reformularse de nuevo.

La consistencia se mide con un índice de consistencia (IC) que se calcula según:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Se compara la consistencia de la matriz de juicios realizada por los expertos con la consistencia de una matriz recíproca generada aleatoria (realmente se hace sobre el promedio de la simulación de 100.000 matrices), llamado índice de consistencia aleatorio (IA). La comparación genera un ratio de consistencia (RC).

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

El valor del índice de consistencia aleatoria puede calcularse de diferentes modos obteniéndose una tabla que asigna un valor de IA en función de la dimensión de la matriz, n .

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

TABLA 5: RELACIÓN ENTRE LA DIMENSION DE LA MATRIZ Y EL ÍNDICE DE
CONSISTENCIA ALEATORIA

Dependiendo del valor de RC se puede concluir que la matriz es:

- $RC = 0$, consistente
- $RC \leq \tau$, inconsistencia admisible, el vector de pesos se admite como válido.
- $RC > \tau$, inconsistente. Se deben revisar los juicios pareados para tener otra matriz R .



El umbral τ toma diferentes valores en función del número de subcriterios involucrados. En la siguiente tabla se muestra los valores propuesto para el umbral que determina la consistencia de la matriz en función del número de subcriterios.

Dimensión de la matriz, n	Umbral τ
3	0.05
4	0.08
5	0.10

TABLA 6: RELACIÓN ENTRE LA DIMENSIÓN DE LA MATRIZ Y EL UMBRAL

3.5.2.2.7 DETERMINACIÓN DE LAS PRIORIDADES ENTRE SUBCRITERIOS

Cuando el modelo del problema de decisión se ha representado mediante una jerarquía que se ha organizado en varios niveles, agrupando criterios de decisión en subcriterios, el cálculo final requiere antes del cálculo del vector de pesos asociado a cada agrupación de subcriterios. Cada nivel superior requiere necesariamente del cálculo previo de todos los pesos de los criterios que se encuentran ligados con él en los niveles inferiores. El procedimiento es el mismo que para el cálculo del criterio global.

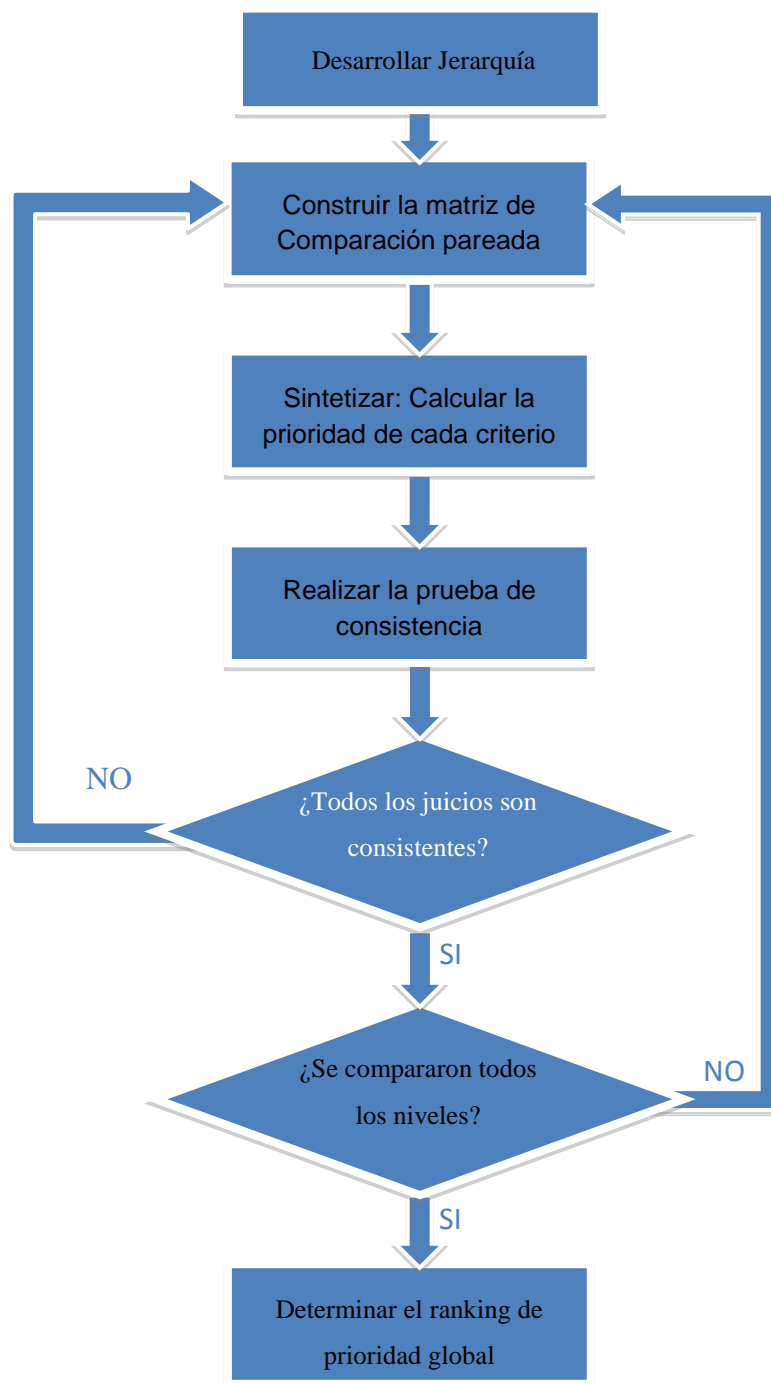


FIGURA 7: ESQUEMA DE DETERMINACIÓN DE LAS PRIORIDADES ENTRE SUBCRITERIOS

4 PROPUESTA DE MODELO PROBABILÍSTICO Y JERÁRQUICO PARA UNA LÍNEA

A lo largo de esta sección, se comparará la distribución de probabilidad del modelo seleccionado (Modelo 3: Estimación de vida de los componentes eléctricos de la red de distribución), con el AHP aplicado a las variables normalizadas de dicha distribución.

El objetivo de esta comparación es tratar de encontrar una relación entre estos dos criterios de evaluación (probabilístico y jerárquico). Para llegar a este punto, se debe hacer un estudio previo de las variables y constantes que componen la fórmula probabilística. Después de éste, se generan los pesos adecuados para cada variable en el modelo jerárquico atendiendo a su importancia relativa dos a dos.

De la comparación entre ambos modelos se debería encontrar un método que permita comunicar ambos criterios.

4.1 VARIABLES PARA EL ESTUDIOS PROBABILÍSTICO Y JERÁRQUICO

Una vez decidido el modelo a estudiar, Modelo 3 (Estimación de vida de los componentes eléctricos de la red de distribución), se procederá al análisis de las variables que componen la fórmula probabilística de éste. El estudio de las variables permitirá entender la función probabilística del modelo (por qué se toma un modelo Weibull) y las variables, que son las que se introducirán el AHP también.

Para ello se desglosará la fórmula por partes para darle un sentido físico a cada variable que influye en el fallo de una línea y fijando para cada una de ellas su valor o rango de estudio.

La fórmula probabilística es:

$$P(t > L) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{S}{S_0} \right)^{\alpha(n-bT)} \cdot \left(\frac{t}{L_0} \right)^{\alpha} \cdot e^{\alpha BT} \right]$$

El desarrollo lógico para la obtención de la fórmula anterior se realiza del siguiente modo:

1. Función de tiempo de vida:

Se parte de un modelo electromecánico que relaciona de manera inversamente proporcional la tensión que pasa por el cable y el tiempo de vida de este componente eléctrico: Cuanto mayor sea la tensión eléctrica que soporta el cable, menor será el tiempo de vida de éste.

La relación inversa entre dichas variable viene regulada por un valor n , denominado coeficiente de esfuerzo-resistencia, tal que:

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-n}$$

Donde:

L : Tiempo de vida [miles de años]

L_0 : Tiempo de vida correspondiente a una temperatura [miles de años]

n : Coeficiente de esfuerzo-resistencia.

S_0 : Tensión eléctrica mínima (límite inferior), esto indica que por debajo de ese valor el envejecimiento (reducción del tiempo de vida) es despreciable.

S : Tensión eléctrica dada por el cable, que debe ser igual o superior a la tensión mínima.

Para el modelo que en este proyecto se va a simular, se establecerán como variables fijas, procedentes de los test de envejecimiento (“aging tests”) del modelo de referencia[9]: L_0 [años], estimado como el tiempo de vida medio para



un conductor, a una temperatura de 25°C, de unos 45000 años, ya que un conductor está compuesto por materiales muy longevos si sus condiciones son las adecuadas y un coeficiente de esfuerzo-resistencia de 7, también procedente del modelo de referencia[9].

En cuanto a S y S_0 , medido en kV/mm, lo interesante para el estudio de la vida media del conductor es el nivel de sobrecarga. Por tanto, se considerará $\frac{S}{S_0}$ como una única variable, con un rango de valor de 1 a 1,5 (con saltos de 0,1), asumiendo la situación de no sobrecarga (1) en la red hasta el aumento del 50% (1,5), en función de la carga mínima.

2. Adición de un componente térmico:

La temperatura del conductor también es influyente a la hora de estimar el tiempo de vida medio y también tiene una relación inversa con éste: cuanto mayor sea la variación de temperatura, menor será el tiempo de vida del cable.

El modelo considera mucho más influyente la temperatura que la sobrecarga en cuanto al envejecimiento del conductor. Por ello la introduce en la fórmula como una exponencial: e^{-BT} .

La decisión de considerar la influencia de la temperatura como una exponente en la función de vida de este componente eléctrico, se justifica gracias al Modelo de Arrhenius[11], que modela la velocidad de degradación térmica en función de la energía de activación y la temperatura.

Según este planteamiento, el tiempo de vida electro-termo-mecánico de un conductor quedará definido de la siguiente manera:

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{-n} \cdot e^{-BT}$$

En nuestro caso, B corresponde a una variable proporcional a la energía de activación de la reacción de degradación del material, en este caso, se fijará a 17000K, siguiendo los datos obtenidos en el modelos de referencia[9] y T [K⁻¹] es la tensión térmica convencional.

T es una simplificación para la variación de la temperatura. El motivo por el que la variación térmica se exprese con las inversas de las temperaturas es que al proceder del modelo de Arrhenius $\left(v = K \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}} \right)$, la expresión para una variación entre dos situaciones térmicas distintas se representa de la siguiente manera:

$$\frac{V_0}{V} = e^{\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta} \right)}$$

Esta expresión corrobora que el valor B depende del material, por lo tanto se mantiene constante a lo largo del tiempo. En cambio, la tensión térmica convencional T cambiará dependiendo de la temperatura del conductor.

$$T = \frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta}$$

Para ello, ϑ_0 [K], es la temperatura inicial, que se considerará igual a la predefinida para S_0 , es decir 25°C, y ϑ es la temperatura que alcanzará el conductor cuando soporte cierta tensión. En este estudio en concreto, se le dará valores comprendidos entre 298 K y 390 K (25°C y 117°C). La elección de este intervalo de temperaturas está justificada para el estudio, ya que se abarca desde la situación ambiental y sin sobrecarga, hasta una temperatura crítica para el conductor. Además, para poder obtener una muestra más representativa para realizar el estudio, el salto dentro de este intervalo será de 1°C (1K).

3. Adición de una función correctiva:

A la función desarrollada en el apartado anterior, se le añade un factor correctivo. El motivo de añadir este componente es la posible aparición de multitensiones. Como ya se ha explicado en el apartado 3.3.2., las multitensiones combinadas dan lugar a una sobreestimación de la sinergia entre las tensiones, que como consecuencia subestiman la vida del conductor, especialmente cuando las tensiones son altas. Es cierto que este trabajo parte de la hipótesis de un conductor asilado de otros componentes eléctricos por lo que podría descartarse este problema, pero lo cierto es que es difícil que en la práctica pueda encontrarse un supuesto en el que el conductor se encuentre totalmente asilado. Por ello y en atención a la posible utilidad posterior de este estudio se ha considerado la conveniencia de introducir este factor que representa en realidad la existencia de una influencia de la red en el problema que consideramos.

Para ello se añade a la fórmula del tiempo de vida, en la componente de sobrecarga, un coeficiente correctivo b [K], relacionado, a su vez, con la temperatura del conductor: $\left(\frac{S}{S_0}\right)^{+b \cdot T}$. Este parámetro, según el modelo de referencia[9], tomará valores comprendido entre 0 y 6000 [K], la dimensión de esta variable se justifica, únicamente, para la anulación de las unidades de la tensión térmica convencional T [K⁻¹].

En definitiva, la función de vida del conductor será:

$$L = L_0 \left(\frac{S}{S_0}\right)^{-(n-bT)} \cdot e^{-BT}$$

Donde:

L : Tiempo de vida [miles de años]



L_0 : Tiempo de vida correspondiente a una temperatura [miles de años]

n : Coeficiente de esfuerzo-resistencia.

S_0 : Tensión eléctrica mínima (límite inferior), esto indica que por debajo de ese valor el envejecimiento (reducción del tiempo de vida) es despreciable.

S : Tensión eléctrica dada por el cable, que debe ser igual o superior a la tensión mínima.

b : Coeficiente correctivo [K].

T : tensión térmica convencional [K^{-1}].

B : Variable proporcional a la energía de activación de la reacción de degradación del material [K].

4. Modelo de distribución de probabilidad:

La función obtenida en los apartados anteriores da como resultado un valor numérico, medido en miles de años. El objetivo de este apartado es la obtención de una probabilidad de fallo en base a los años de vida del conductor. Por tanto para la obtención de una probabilidad de fallo se debe expresar este valor numérico como una escala.

Para esta situación, se utiliza la función Weibull. Esta solución se puede utilizar para calcular la probabilidad de fallo en un determinado tiempo como consecuencia del envejecimiento.

De acuerdo, con ella la probabilidad genérica de fallo de un componente en un determinado tiempo, es:

$$P(t; \alpha, \gamma) = 1 - e^{-\left(t/\lambda\right)^\alpha}$$

Donde el parámetro de escala, λ , indica en base a qué se comparará la entrada, y α que es el parámetro de forma, que modifica la curvatura de la función.

Para nuestro estudio se considerará como parámetro de escala λ , la función de tiempo de vida L , desarrollada en los apartados anteriores, y como parámetro de forma α , el valor fijado 5,1, procedente del modelo seleccionado para el estudio[9].

Para este trabajo, el estudio de probabilidad de fallo se plantea en el transcurso del primer año de funcionamiento, debido a que son las condiciones de partida del este estudio en concreto y porque este estudio será más fiable, ya que el conductor estará sometido a menos condiciones exógenas que pudieran cambiar las condiciones y por tanto los resultados.

5. Conclusión parcial.

Con todas las especificaciones, fórmula probabilística resultará:

$$P\left(\frac{S}{S_0}, \vartheta, b\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S}{S_0}\right)^{\alpha(n-bT)} \cdot \left(\frac{t}{L_0}\right)^{\alpha} \cdot e^{\alpha BT}\right]$$

A modo de resumen final, las constantes y variables establecidas para este estudio serán:



CONSTANTES			
Nombre	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de vida correspondiente a 25°C	L_0	45000	años
Temperatura de sufrimiento en el conductor	ϑ_0	298	Kelvin
Parámetro de forma	α	5.1	
Variable proporcional a la energía de activación de la reacción de degradación del material	B	17000	Kelvin
Coefficiente de esfuerzo - resistencia	n	7	
Tiempo para el estudio	t	1	año

TABLA 7: RESUMEN DE LAS CONSTANTES

VARIABLES				
Nombre	Símbolo	Valor mínimo	Valor máximo	Unidades
Coefficiente correctivo	b	0	6000	Kelvin
Temperatura del conductor	ϑ	298	390	Kelvin
Nivel de sobrecarga	$\frac{S}{S_0}$	1	1,5	

TABLA 8: RESUMEN DE LAS VARIABLES

4.2 ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE FALLO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES

Como se acaba de ver, el modelo probabilístico de este estudio está compuesto por 3 variables: b (Coeficiente correctivo), ϑ (Temperatura del conductor) y S/S_0 (nivel de

sobrecarga). Para poder comprender mejor cómo evoluciona la función de probabilidad de fallo del conductor, es necesario reducir las dimensiones de nuestra fórmula para visualizar lo influyente que puede ser cada variable y donde existen grandes variaciones.

4.2.1 Fijación del coeficiente correctivo b

Para empezar, se fija el coeficiente correctivo b y se observa cómo se va desarrollando la probabilidad de fallo en el cable a medida que aumenta la temperatura ϑ y para cada tipo de carga.

Estableciendo los rangos anteriormente descritos, la simulación de estas variables queda de la siguiente manera:

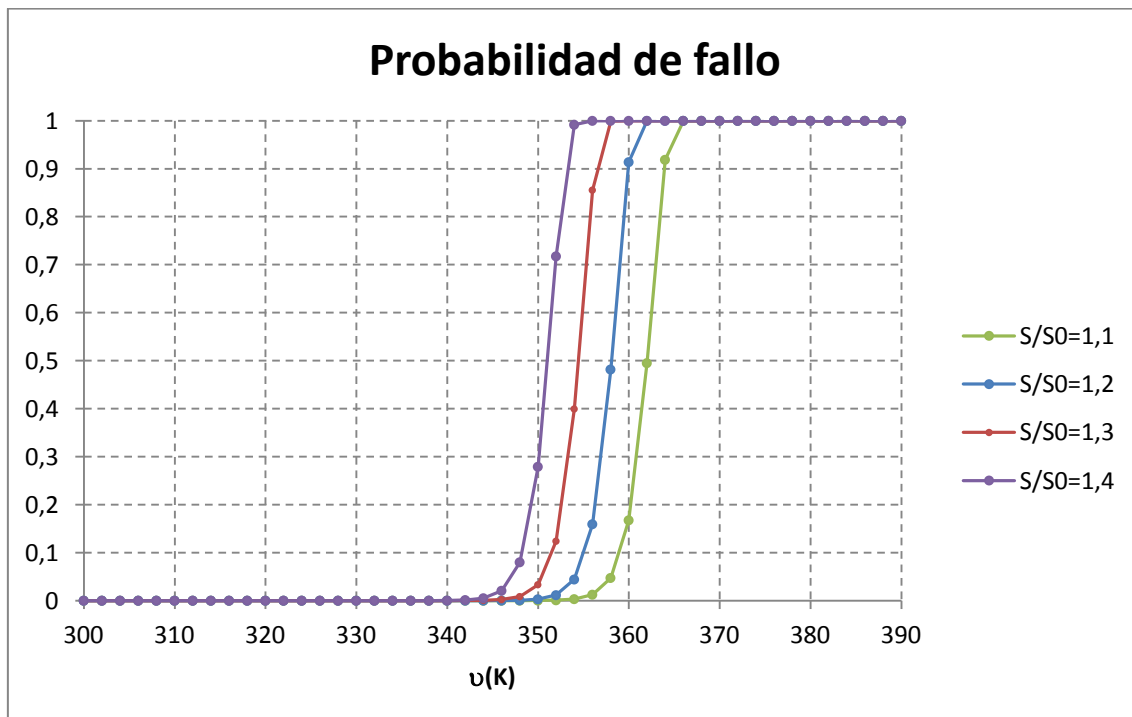


FIGURA 8: PROBABILIDAD DE FALLO DE UN CONDUCTOR FIJANDO EL FACTOR CORRECTIVO b



Como se observa en el gráfico, existe un cambio en la probabilidad de fallo de una variación aproximada de 20 K. Esto explica, que los materiales del cable de la red de distribución soportan bastante bien las tensiones térmicas de degradación y eléctricas debidas a sobrecargas hasta un límite (aproximadamente 345 K, es decir 72°C) a partir del cual fallan con bastante probabilidad.

Éste límite disminuye a medida que la sobrecarga aumenta, lo cual resulta bastante razonable. Conviene destacar también que el salto de una probabilidad de fallo nula a una del 100% es relativamente pronunciada. Por ejemplo, para una temperatura de 340K (67°C) y un nivel de sobrecarga de 1,2, la probabilidad de fallo es 0, en cambio, con la misma sobrecarga y a una temperatura de 360K (87°C) la función indica una probabilidad de fallo en el conductor segura.

4.2.2 Fijación de la temperatura ϑ

Por otro lado, si se fija la variable temperatura ϑ , en un valor donde, como se puede observar la probabilidad es nula, por ejemplo, 330 K (57°C), y se observa lo que sucede a medida que aumenta el coeficiente correctivo b , la situación es bastante diferente:

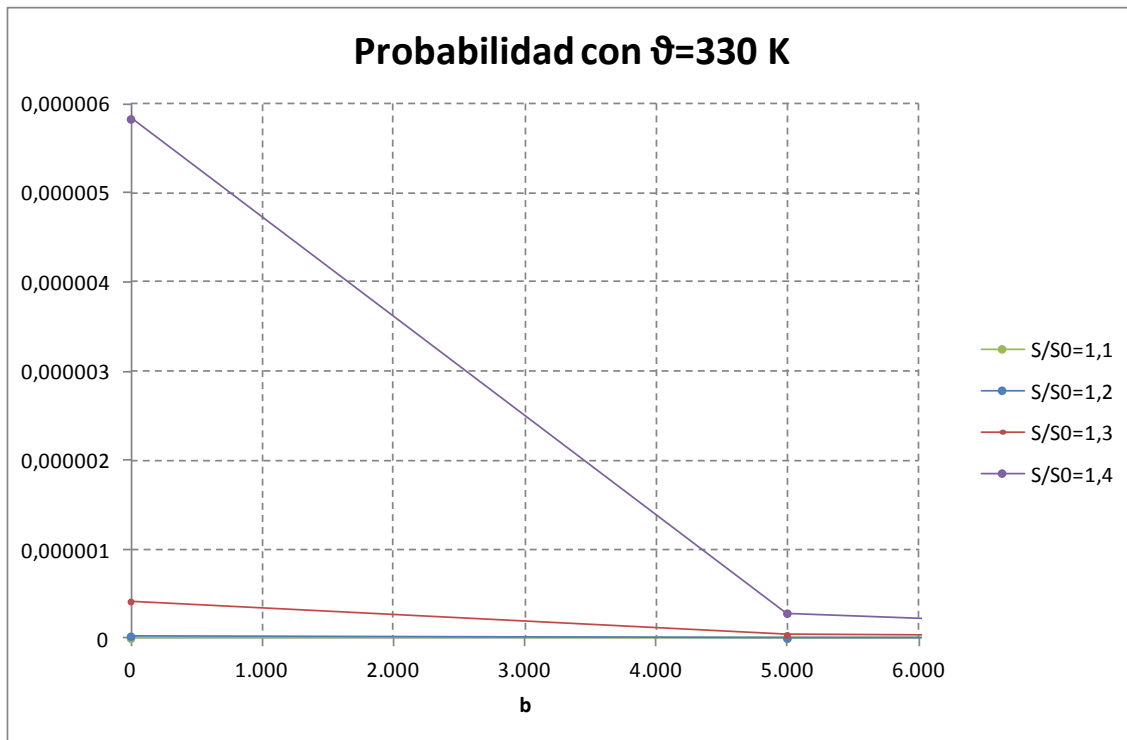


FIGURA 9: PROBABILIDAD DE FALLO DE UN CONDUCTOR FIJANDO LA TEMPERATURA A 330K

La probabilidad de fallo, dependiendo del grado de sobrecarga, varía bastante poco en relación al coeficiente correctivo b , del orden de 10^{-6} , evidentemente muy baja y prácticamente cero, para temperaturas inferiores a 345 K (límite de trabajo del conductor con probabilidad de fallo 0). Esto explica la poca influencia que tiene a temperaturas relativamente bajas.

Estableciendo una temperatura ϑ del intervalo donde se produce el cambio de probabilidad, 345 K-365 K, la situación probabilística de fallo del conductor experimenta un cambio severo:

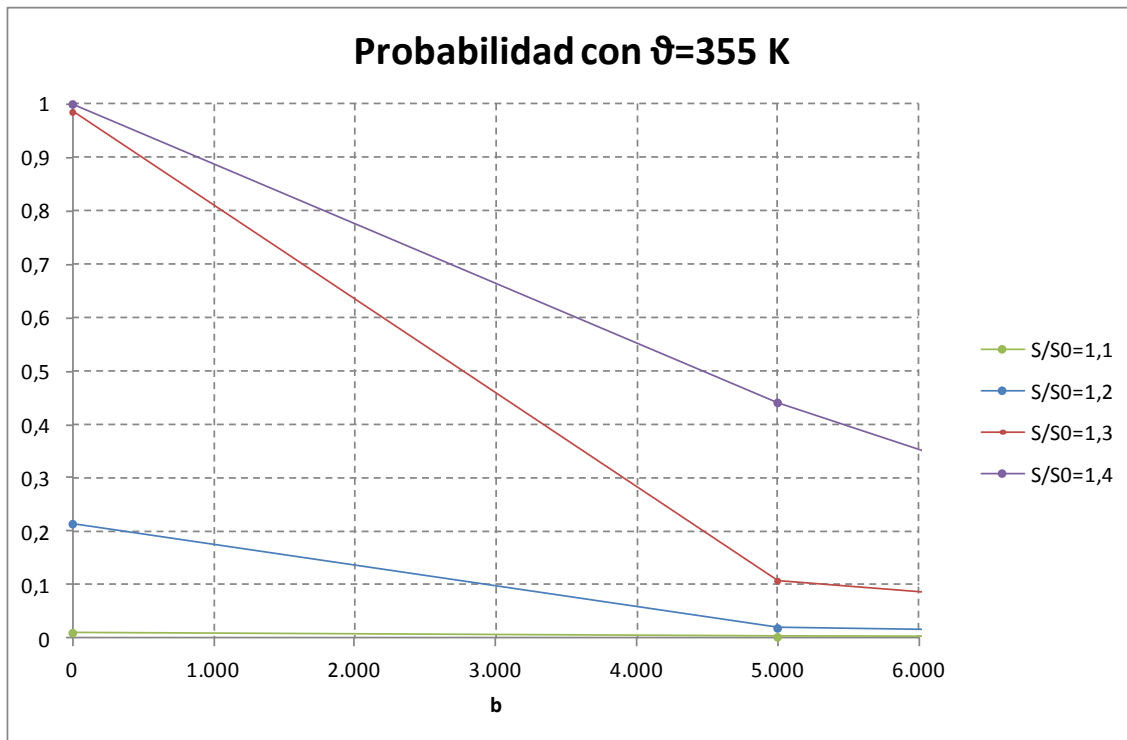


FIGURA 10: PROBABILIDAD DE FALLO DE UN CONDUCTOR FIJANDO LA TEMPERATURA A 355K

En esta situación, la probabilidad de fallo en función de la sobrecarga, tiene un papel importante a la hora del cálculo final de la probabilidad de fallo de un conductor.

La relación entre ambas variables es inversa, por ello tiene una gran importancia a medida que aumenta, porque reducen la probabilidad de fallo del conductor.

Cabe mencionar, a su vez, que el nivel de sobrecarga de la línea afectará al resultado final: con una carga nula o baja, la probabilidad de fallo es muy reducida, pero a cargas altas, las posibilidades de fallo en el conductor son mucho más altas.

Por último, como es de esperar, si se fija una temperatura ϑ por encima de 365 K la probabilidad de fallo será mucho más alta de por sí:

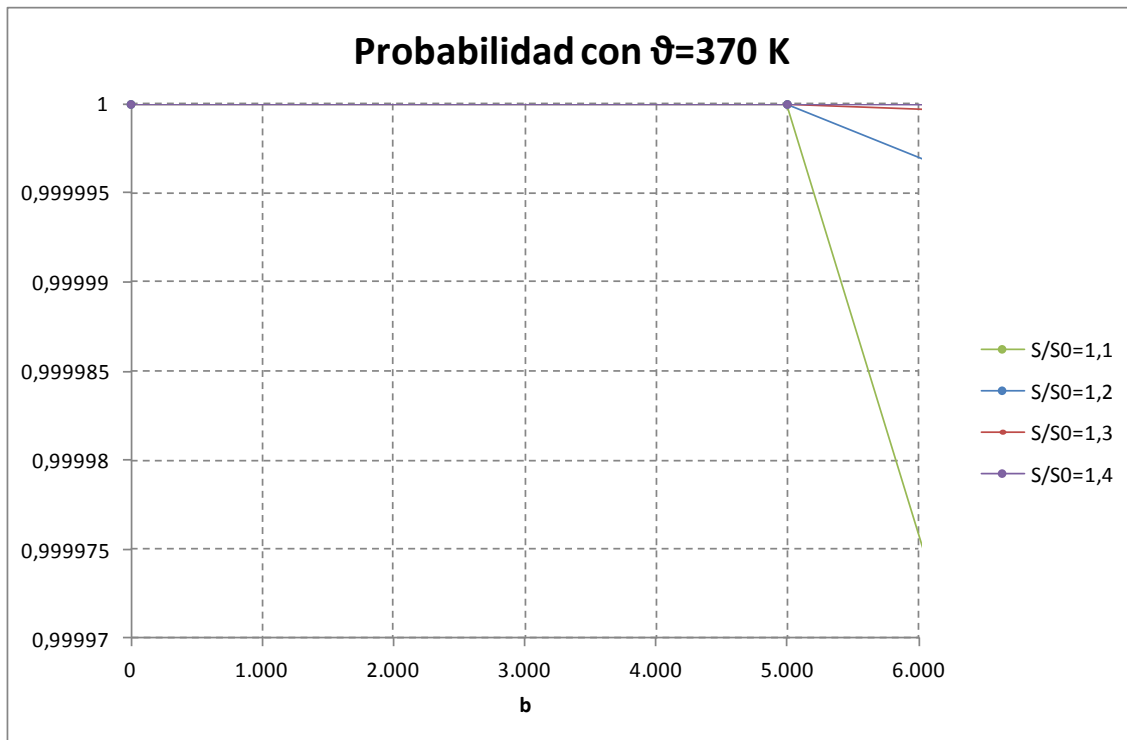


FIGURA 11: PROBABILIDAD DE FALLO DE UN CONDUCTOR FIJANDO LA TEMPERATURA A 370K

La posibilidad de fallar del conductor es muy alta, prácticamente segura. A partir de un factor correctivo, b , de 5000, la función podrá reducir esa probabilidad de fallo, pero con un grado tan bajo, que no se considerará mencionable en este estudio.

A la vista de éste análisis, tratando tener una visión más real del comportamiento de éste modelo, se prepara una simulación con las variables anteriormente mencionadas, dentro de sus rangos:

Nivel de sobrecarga S/S_0 : Desde 1 a 1,5 (Salto de 0,1).

Temperatura θ : Desde 298 K a 390 K (25°C y 117°C) (Salto de 1K).

Coeficiente correctivo b : Desde 0 a 6000 [K] (Salto de 1)

Se realiza un estudio asignando valores aleatorios, dentro de los rangos anteriormente descritos, a las variables del estudio de probabilidades. Una vez introducidas dentro de la función probabilística, para poder observar cómo se reparten estas probabilidades, se agrupan por intervalos de resultado de probabilidad y se representa en un histograma como el que se indica a continuación:

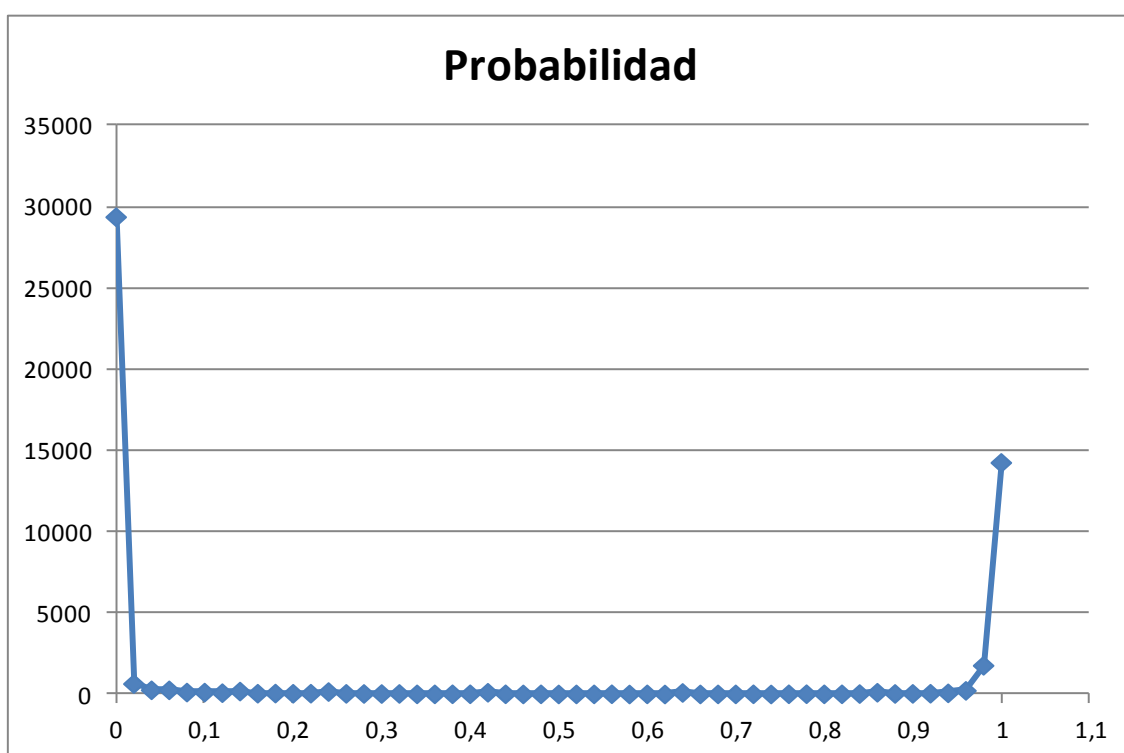


FIGURA 12: HISTOGRAMA DE LA PROBABILIDAD DE FALLO

Este gráfico, evidencia que el conductor eléctrico, a lo largo del primer año, tiene una probabilidad de no fallar mucho más alta que cualquier otra situación, lo cual resulta aceptable, porque ésa es la demanda y requisitos de los clientes y consumidores de la red eléctrica. Además de satisfacer las regulaciones vigentes que exigen un número y duración de las interrupciones muy bajas, reclamando así unas garantías de servicio de calidad, por parte del Estado.



Se puede observar, además, que la transición de probabilidad 0 (no hay fallos en el conductor) a 1 (probabilidad de fallo seguro), según los órdenes de magnitud tomados, es muy poco apreciable. Por ello, la segunda opción más probable es que falle y se mantiene de forma muy reducida el resto de probabilidades.

En resumen, esta función sigue la forma de U, donde los extremos son los que explican que las probabilidades se reparten, en su mayoría en los extremos (probabilidad nula, 0, o probabilidad segura, 1), quedando en un segundo lugar la tránsito de un extremo al otro.

4.3 ESTUDIO DEL PROCESO ANÁLISIS JERÁRQUICO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES

Para poder realizar el estudio del AHP (Proceso de Análisis Jerárquico), se debe preparar en modelo con las variables normalizadas.

Como se explicó en el apartado 3.5.2.2.5. se debe establece un grado de importancia (por parejas) de las variables normalizadas, que se introduce en la matriz de comparaciones pareadas.

Del resultado de éste análisis, se obtiene un peso α_i para cada variables. Estos pesos deben cumplir una serie de restricciones, entre otras, que la suma total de los pesos debe dar la unidad. Gracias a esta restricción y a las variables normalizadas, el modelo de AHP se puede asemejar a una probabilidad, ya que el resultado estará comprendido entre 0 (límite inferior) y 1 (límite superior), como las probabilidades.

Restricción para el cálculo de los pesos:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$$

Como resultado de estas restricciones la salida de la AHP estará comprendida entre 0 y 1:

$$0 \leq AHP \leq 1$$

El diagrama, para este estudio en concreto, tiene como objetivo (Goal) el cálculo del riesgo de fallo y contiene 3 criterios o variables (Nivel de sobrecarga S/S_0 , temperatura ϑ y coeficiente correctivo b) que se deberán comparar por parejas:

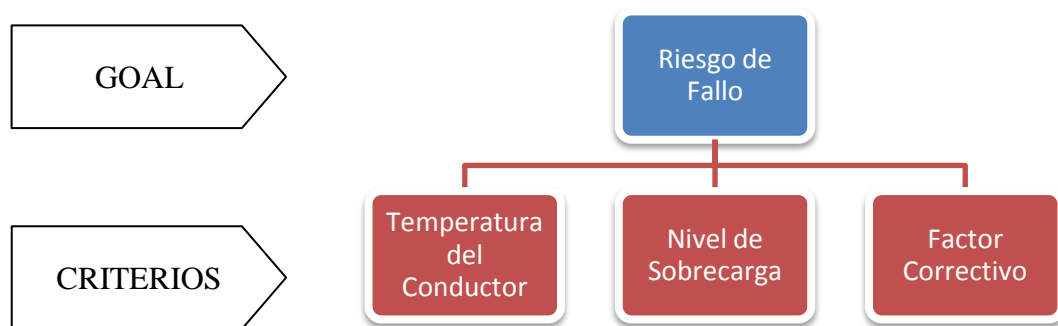


FIGURA 13: ESQUEMA DEL MODELO DE TOMA DE DECISIÓN PARA ESTE CASO

Para llegar a los pesos α_i para cada variable, primeramente, se debe proceder a la normalización de cada una de las variables del sistema:

- Para el valor de la **sobrecarga**, $\frac{S}{S_0}$, la normalización me permitirá escalar linealmente la variable, de manera que el mínimo, que en este caso era 1, ahora sea 0 y el máximo, que valía 1,5 ahora sea 1. Esto se consigue restándole a la entrada el valor mínimo y dividiéndolo entre el rango de la variable:

$$(S/S_0)^{norm} = \frac{(S/S_0) - (S/S_0)_{mínimo}}{(S/S_0)_{máximo} - (S/S_0)_{mínimo}}$$

En este estudio, en concreto, la sobrecarga normalizada quedará del siguiente modo:

$$(S/S_0)^{norm} = \frac{(S/S_0) - 1}{0,5}$$

- En el caso de la **temperatura, ϑ** , se normaliza por el mismo motivo y de la misma manera que con la sobrecarga:

$$\vartheta^{norm} = \frac{\vartheta - \vartheta_{mínimo}}{\vartheta_{máximo} - \vartheta_{mínimo}}$$

Para éste análisis, quedaría:

$$\vartheta^{norm} = \frac{\vartheta - 298}{92}$$

- Por último el **factor correctivo, b** , como se analizó en el punto 4.2.2., tiene una relación inversa en la función de probabilidad, por ello, su valor normalizado será igual que para las variables anteriores, pero restándoselo a 1, para que, de este modo, se invierta:

$$b^{norm} = 1 - \frac{b - b_{mínimo}}{b_{máximo} - b_{mínimo}}$$

Aplicando sus valores máximos y mínimos, indicados en el apartado 4.1, b^{norm} se ve reducido a:

$$b^{norm} = 1 - \frac{b}{6000}$$

De esta manera, el Modelo de AHP quedará:

$$AHP = \alpha_1 \cdot (S/S_0)^{norm} + \alpha_2 \cdot \vartheta^{norm} + \alpha_3 \cdot b^{norm}$$

De tal manera que cada variable, ya normalizada, forman parte de una combinación lineal para la AHP. Cada valor α corresponde al peso asignado a una de estas variables.

Una vez aplicadas las normalizaciones especificadas, se procede a dar un peso a cada una de ellas. Para ello se aplica en la matriz de comparaciones pareadas R un valor r_{ij} procedente de la escala de prioridad de Saaty[12]:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Escala de prioridad de Saaty	
Importancia	Valor
Igual	1
Ligeramente mayor	3
Bastante mayor	5
Muchos mayor	7
Absolutamente mayor	9

TABLA 9: ESCALA PRIORIDAD DE SAATY

En este estudio, dado que se evalúan 3 variables, la matriz de comparaciones pareadas será de 3x3:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1/r_{21} & 1/r_{31} \\ r_{21} & 1 & 1/r_{23} \\ r_{31} & r_{23} & 1 \end{pmatrix}$$

Especificando la importancia comparativa entre las variables, la matriz R quedará del siguiente modo:



	S/S_0	ϑ	b
S/S_0	1	1/3	1/7
ϑ	3	1	1/5
b	7	5	1

TABLA 10: VALORES PARA LA MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS R

Obteniendo unos pesos de:

- $\alpha_1=0,08096$ (Peso para la sobrecarga)
- $\alpha_2=0,18839$ (Peso para la temperatura)
- $\alpha_3=0,73064$ (Peso para el coeficiente correctivo)

Con un IC (Índice de Consistencia) de 0.03636.

Según la última tabla del apartado 3.5.2.2.6., el umbral apropiado para la matriz cuadrada R de dimensiones $n=3$ es $\tau = 0.05$. Este valor se compara con el Ratio de Consistencia (RC).

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,03636}{0,52 * 5} = 0,014$$

Donde IA es el Índice de Consistencia aleatoria, tabulado en el apartado 3.5.2.2.6., para que el resultado se considere válido, debe cumplirse: $RC \leq \tau$, (inconsistencia admisible).

En este caso, el IC es adecuado para el estudio.

Para estos resultados, en cuestión, el AHP quedará:

$$AHP = 0,08096 \cdot (S/S_0)^{norm} + 0,18839 \cdot \vartheta^{norm} + 0,73064 \cdot b^{norm}$$

Una vez analizado el AHP del conductor, normalizando y calculando los pesos de cada una de las variables. Se obtiene gráficamente el siguiente resultado del AHP por histograma, para poder observar cómo se reparten los resultados del proceso de análisis jerárquico:

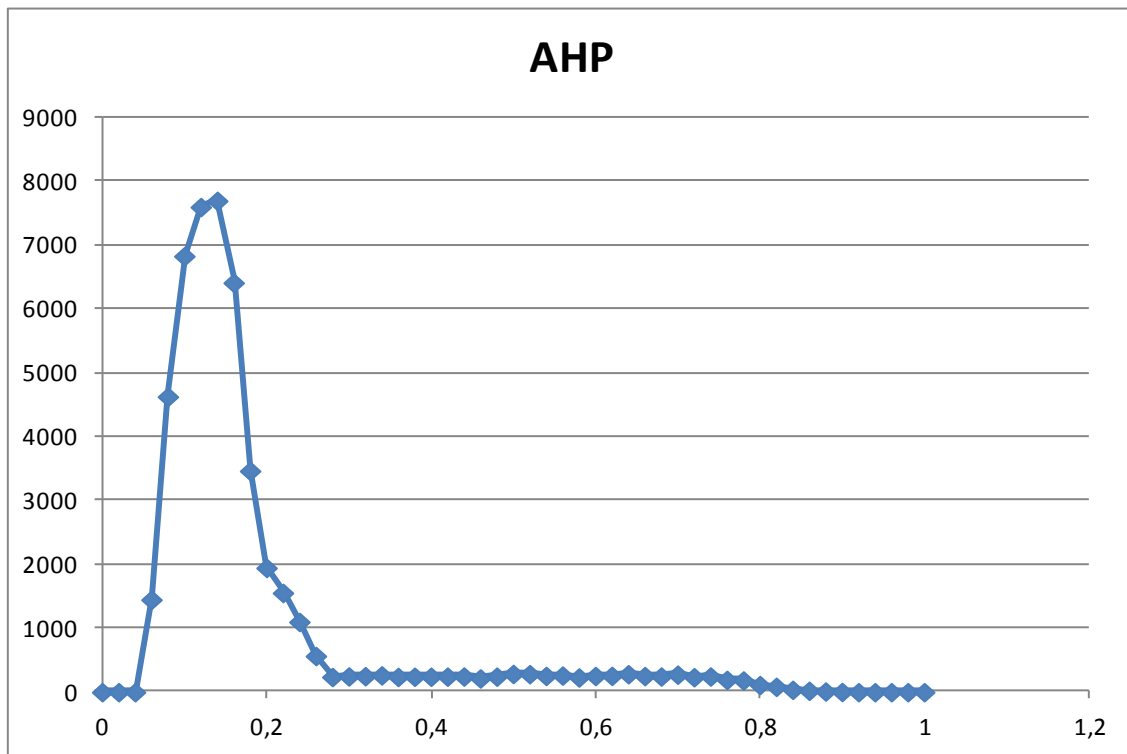


FIGURA 14: HISTOGRAMA DEL AHP

En esta gráfica se puede afirmar que la mayoría de la salida de la AHP se localiza en el intervalo 0,06 y 0,22. Esta observación podría ser aceptada a la hora de establecer una relación entre el modelo probabilístico y jerárquico. Sin embargo, la zona central y final del gráfico se mantienen constantes y muy cercanas a cero, esto significa, que no debe de existir riesgo de fallo, y de haberlo sería prácticamente imposible.

4.4 COMPARACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y AHP

A la vista de los resultados obtenidos en los dos apartados anteriores, se debe concluir que los datos resultantes no se asemejan lo suficiente para poder establecer una relación que pueda permitir extrapolar los datos de un modelo al otro.

Los resultados obtenidos resultan lógicos debido a que la distribución de la salida en cada modelo es distinta: el modelo probabilístico tiene forma de U, mientras el AHP solo tiene un máximo al principio.

Matemáticamente hablando, esta afirmación se apoya en el hecho de que el modelo probabilístico se calcula a partir de **potencias y exponenciales** y el AHP establece por defecto que las variables a estudiar tienen un comportamiento **lineal**.

Este contraste extremado provoca un error muy alto a la hora de hacer el cálculo jerárquico. En el siguiente gráfico se puede ver representada esta diferencia tan amplia.

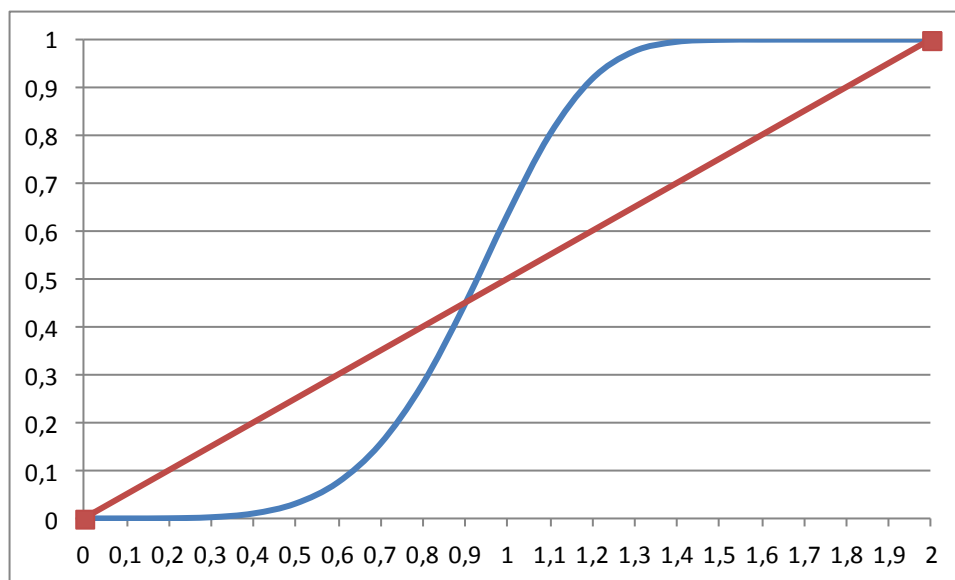


FIGURA 15: MODELO GENÉRICO DE PROBABILIDAD (AZUL) Y AHP (ROJO)

4.5 RESOLVER EL PROBLEMA NORMALIZANDO LA ENTRADA

Esta contingencia, puede solucionarse estableciendo una serie de normalizaciones no lineales a las variables del proyecto en cuestión. Una opción óptima y sencilla es transformar cada variable en una función lineal a trozos. Como se observa en la siguiente gráfica, el margen de error se reducirá considerablemente gracias a esta modificación.

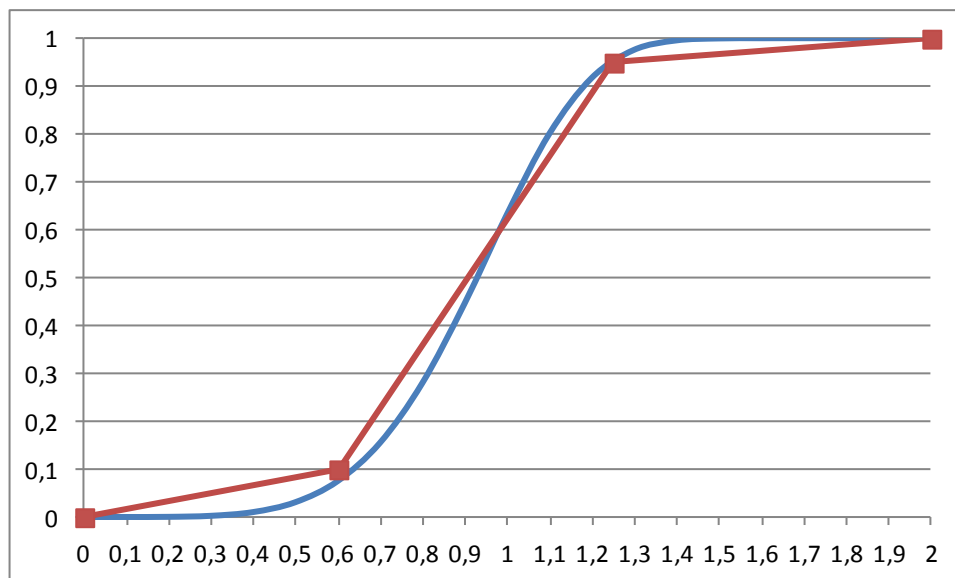


FIGURA 16: MODELO GENÉRICO DE PROBABILIDAD (AZUL) Y AHP (ROJO) NORMALIZADA A TROZOS

Cada función se definirá siguiendo la tendencia aproximada que se muestra en el estudio del modelo probabilístico 4.2 para cada una de las variables. De este modo, el margen de error entre ambos modelos se reduce, generando por tanto una salida más fiable y más cercana a la probabilística.

4.5.1 Normalización de la temperatura 9

Para la temperatura, el cambio es considerable, ya que claramente, existe un intervalo de temperaturas (zona central del gráfico) donde el crecimiento de la probabilidad de fallo es mayor. La función de la temperatura quedará definida claramente por tres tramos del siguiente modo:

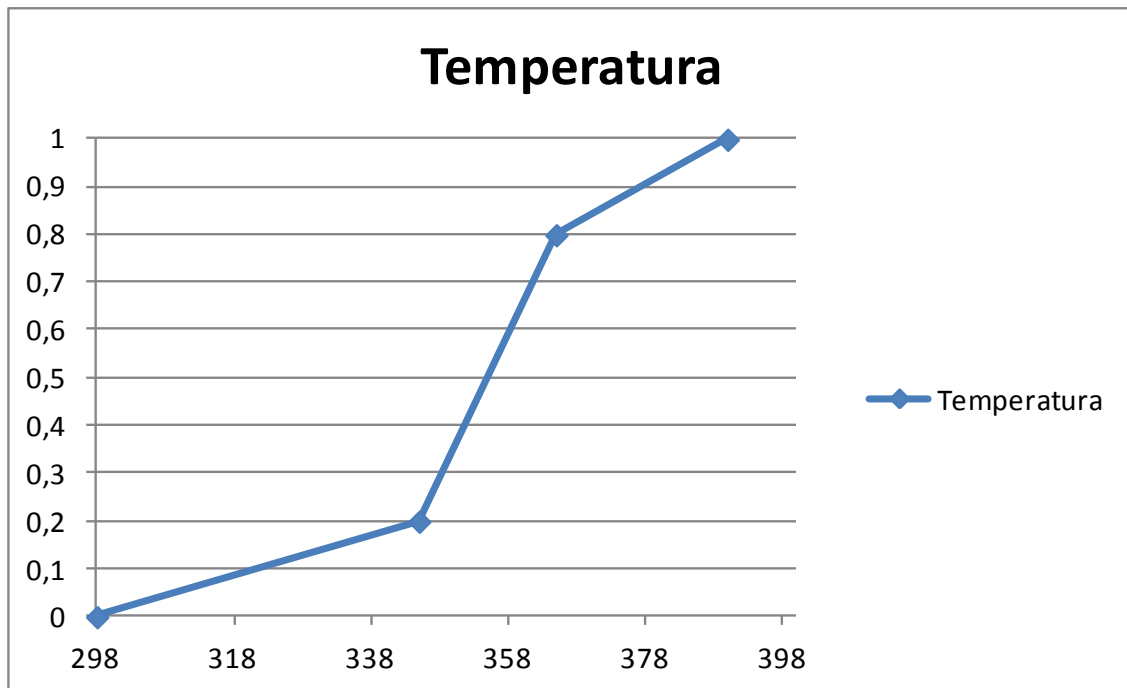


FIGURA 17: MODELO DE LA TEMPERATURA NORMALIZADO

4.5.2 Normalización del factor correctivo b

El factor correctivo es la variable más influyente del modelo. La variación de este parámetro, en ciertos tramos, puede generar cambios en la salida de la AHP.



Como se observó gráficamente en el estudio de la probabilidad (fijando la temperatura, 9) del apartado 4.2.2. la pendiente de esta función es negativa, por lo que la relación entre el factor correctivo, b , y la probabilidad es inversa, por lo que, a diferencia de las otras variables, a medida que aumente la entrada, b (factor correctivo), la salida del modelo jerárquico irá reduciéndose.

En el apartado 4.2.2, a su vez, la evolución de la gráfica Probabilidad en función del valor del factor correctivo, b , cuyo intervalo era [0-6000] experimenta una variación de pendiente significativa:

- 1) En el primer tramo (aproximadamente desde $b=0$ hasta el valor $b=100$) la pendiente es muy alta
- 2) El segundo tramo, en contraposición, la inclinación es muy baja, prácticamente 0.

Por ello, esta variable se normalizará solo en dos tramos. Siguiendo la descripción anteriormente justificada, la normalización de la variable “factor de correctivo”, b , queda del siguiente modo:

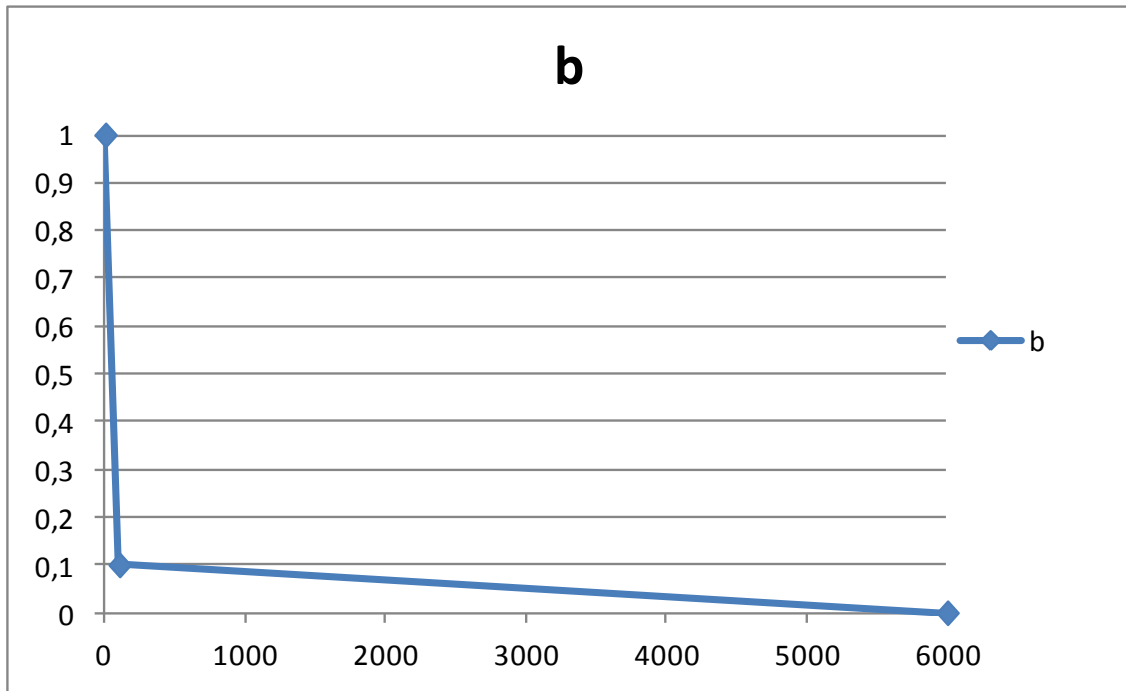


FIGURA 18: MODELO DEL FACTOR CORRECTIVO NORMALIZADO

4.5.3 Normalización de la Sobrecarga S/S_0

La sobrecarga, al igual que con la temperatura, sufre un cambio brusco en su función probabilística en la zona central del gráfico, esto también podría trasladar errores al estudio del AHP, que afectarían a la veracidad de éste. Por ello, esta entrada se normalizará linealmente en tres trozos tal y como se muestra en el gráfico siguiente:

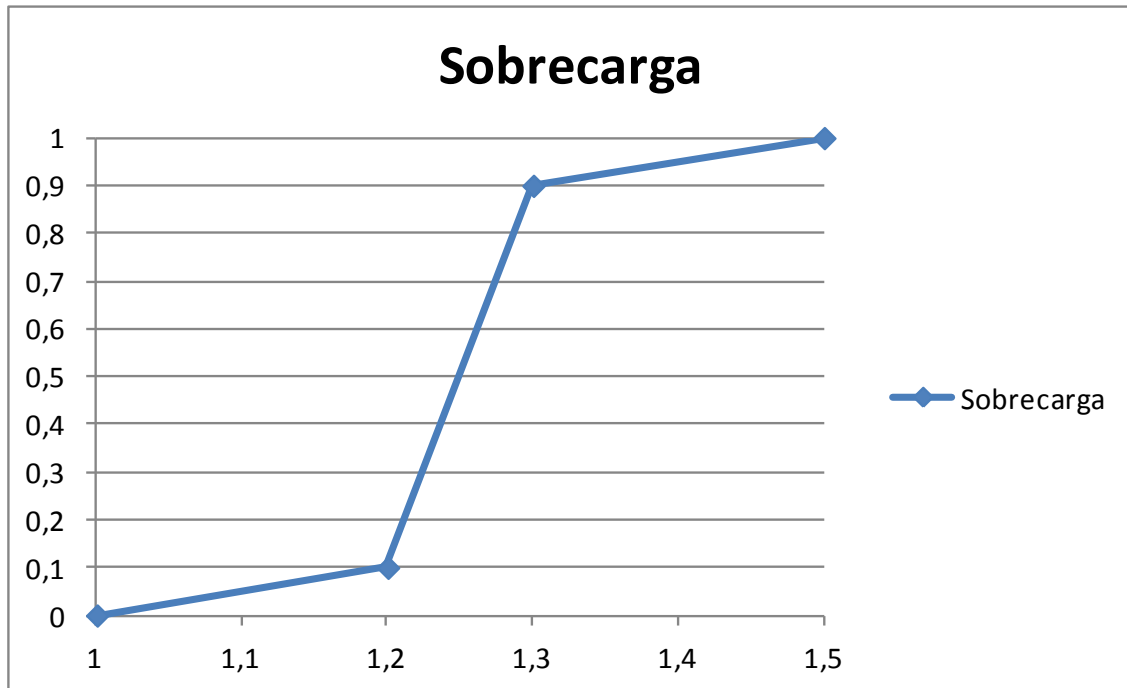


FIGURA 19: MODELO DE LA SOBRECARGA NORMALIZADO

4.6 COMPROBACIÓN

Con estas modificaciones, se repite el estudio del AHP con las nuevas restricciones en la normalización de las variables b (Factor correctivo), ϑ (Temperatura) y S/S_0 (Nivel de sobrecarga). Consecuentemente, la modificación del comportamiento de las variables produce un cambio importante en el valor de los pesos asignados a cada variable anteriormente definidos.

Se deben recalcular los pesos α_i , para ello, previamente se establece, de nuevo, la nueva importancia comparativa entre las variables. La matriz R (matriz de comparaciones pareadas) se ve modificada:



	S/S_0	ϑ	b
S/S_0	1	1/3	1/5
ϑ	3	1	1/5
b	5	5	1

TABLA 11: NUEVOS VALORES PARA LA MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS R

Aplicando los cálculos pertinentes, los nuevos pesos α_i , de cada variable del conductor serán:

- Para la sobrecarga, S/S_0 : $\alpha_1=0,70071$
- Para la temperatura, ϑ : $\alpha_2=0,09717$
- Para el coeficiente correctivo, b : $\alpha_3=0,20212$

El índice de consistencia (IC) es de 0,076.

Según la última tabla del apartado 3.5.2.2.6., el umbral para la matriz cuadrada R de dimensiones $n=3$ es $\tau = 0.05$. Este valor se compara con el Ratio de Consistencia (RC), que dará.

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,076}{0,52 * 5} = 0,0293$$

El índice de consistencia aleatoria (IA), tabulado en el apartado 3.5.2.2.6., para que el resultado se considere válido, debe cumplirse: $RC \leq \tau$, (Inconsistencia admisible). En este caso, el IC es apropiado para este estudio.

El modelo AHP normalizado a trozos, quedaría del siguiente modo:

$$AHP = 0,70071 \cdot (S/S_0)^{norm} + 0,09717 \cdot \vartheta^{norm} + 0,20212 \cdot b^{norm}$$



En comparación con la AHP de opción anterior (apartado 4.3), los pesos se reparten de manera muy diferente. El motivo de que ocurra esto es que las variaciones en el modelado de las variables también han cambiado mucho. Como consecuencia:

- Sobrecarga: el peso 0,08096 cambia 0,70071. Es decir su influencia a la hora del resultado final será muy importante.
- Temperatura: se reduce de 0,18096 a 0,09717. La importancia de la variable temperatura en el AHP se ve disminuir en cierta medida, teniendo en cuenta que no es una variable muy decisiva.
- Factor correctivo: Esta variable sufre un cambio drástico en cuanto a su efecto en la variable de salida AHP (de 0,73064 a 0,20212)

Con el estudio del nuevo AHP de la línea, con sus normalizaciones a trozos y calculando los pesos de cada una de las variables, se obtiene gráficamente el siguiente resultado del AHP por histograma de probabilidades, para comprobar si los resultados del proceso de análisis jerárquico se asemeja más al probabilístico que en el grafico previo:

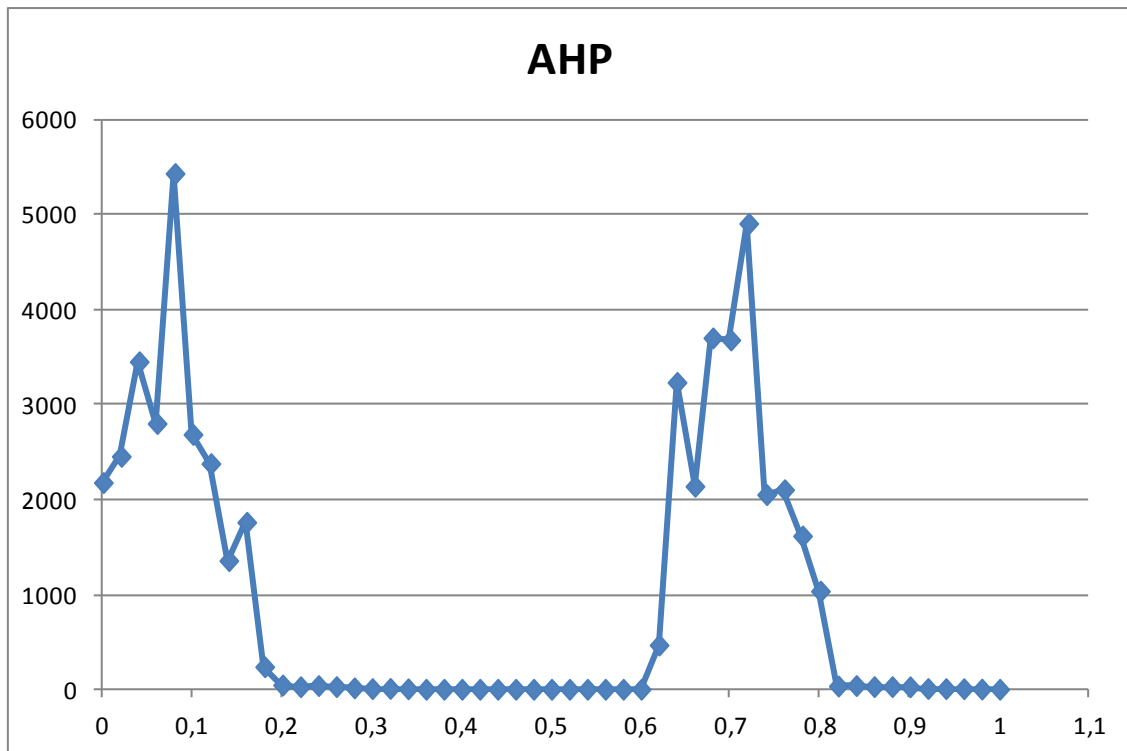


FIGURA 20: HISTOGRAMA DEL AHP CON LA ENTRADA NORMALIZADA A TROZOS

La salida de la AHP resulta más apropiada que en el caso de las normalizaciones lineales simples. Ya que existen dos máximos, que podrían asociarse a los correspondientes puntos significativos del modelo probabilístico (probabilidad no haber fallo y probabilidad de fallo seguro). Aunque, como se puede observar en esta situación, estos puntos no se encuentran en los extremos. Este hecho puede solucionarse aplicándole un factor correctivo a la AHP y estableciendo como extremos los puntos 0,08 y 0,72:

AHP		Probabilidad
0,08	→	0
0,72	→	1

TABLA 12: TABLA DE RELACIONES ENTRE EL MODELO PROBABILÍSTICO Y EL AHP

De este modo, se le aplica un factor correctivo a la AHP que permitirá relacionar de manera lineal ambos modelos.

$$Probabilidad = \frac{AHP}{0,64} - \frac{1}{8}$$

Con la función de probabilidad anterior:

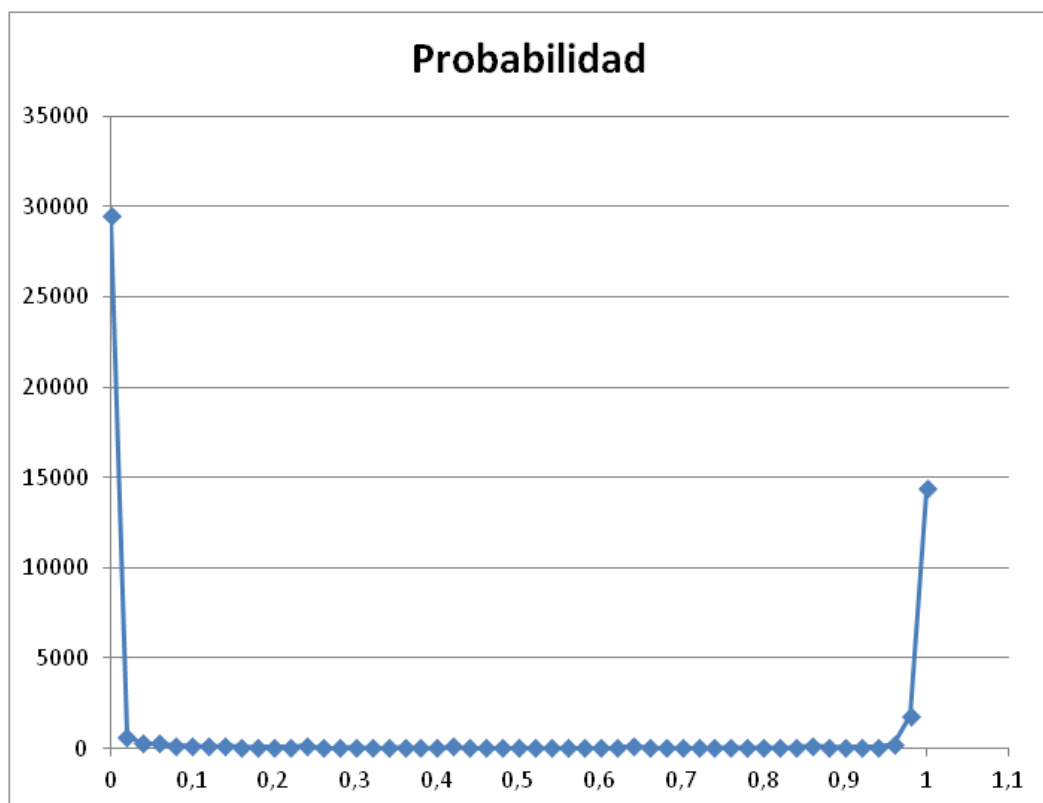


FIGURA 21: HISTOGRAMA DE LA PROBABILIDAD DE FALLO

El modelo de AHP, con las normalizaciones pertinentes, y aplicándole la corrección que se obtiene es:

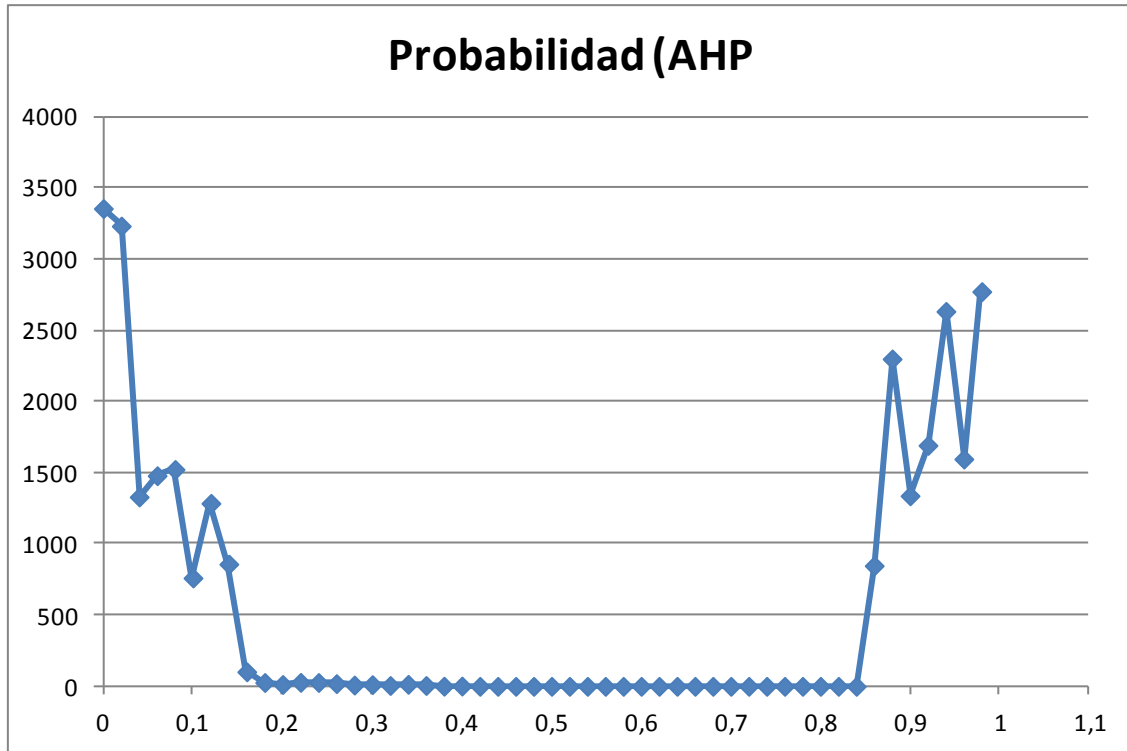


FIGURA 22: MODELO DE PROBABILIDAD DE FALLO EN FUNCIÓN DEL AHP

Queda establecida una relación entre la probabilidad de fallo de un conductor y su AHP correspondiente, siempre que los requisitos anteriormente descritos se lleven a cabo. En resumen, debe cumplirse una normalización lineal a trozos por parte de cada una de las variables que intervienen en el proceso y además, existe un coeficiente correctivo que debe aplicarse al AHP.



5 CONCLUSIONES

Este proyecto contiene varios temas en los que conviene reflexionar sobre sus consecuencias o importancias presentes y futuras. Ya que esto marca una posible línea de investigación para futuros estudios en profundidad.

En primer lugar, el problema que se pretende solventar (Fallo en las líneas eléctricas) tiene una relevancia elevada. La continuidad y correcto suministro de electricidad en el sistema eléctrico español es de vital importancia debido a la dependencia de la sociedad a este servicio. Por ello, los gobiernos tratan de regular este sector con el fin de satisfacer las necesidades de la población, y en caso de no cumplimiento (interrupción en el servicio), aplicar sanciones de gravedad. En este sentido, se genera una competitividad entre empresas del sector, lo que permite disponer de mejores precios para el consumidor y mejorar su reputación gracias a sus estrategias empresariales.

Tradicionalmente, el mantenimiento de las líneas eléctricas requería de un factor histórico y experimental por parte de los responsables de estas operaciones. Éste hecho no permite tener una visión objetiva del problema a tratar, ya que los criterios están infundados por una experiencia personal. El peligro de este tipo de mantenimiento es que se genera una dependencia hacia el especialista y/o encargado del mantenimiento que puede afectar negativamente a la empresa en el caso de ausencia o renuncia del puesto. Por ello, es más razonable establecer un modelo lógico de predicción y decisión que permita acumular la experiencia.

A día de hoy existen modelos de mantenimiento predictivo, pero también poseen carencias que dificultan su estudio. Entre otras barreras, cabe mencionar la ausencia de datos experimentales para probar los modelos de mantenimiento existentes. El motivo de esta escasez de información podría tener varias causas, por ejemplo, los acuerdos de confidencialidad que tienen las empresas de distribución de energía eléctrica con sus especialistas, ya que se trata de una cuestión estratégica empresarial. Otra posible causa



podría ser, simplemente, que no existen estos datos y no se ha investigado o estudiado en profundidad de manera objetiva.

Ésta carencia de datos explica, a su vez, la ausencia de fuentes bibliográficas que hablen y expliquen modelos probabilísticos de fallo en la red de distribución eléctrica, que dificulta y limita en gran medida el estudio realizado en este proyecto. Este problema tiene como consecuencia que los estudios que existen son investigaciones muy concretas (depende de la regulación del país donde se ha hecho el estudio y las mediciones, del clima, la demanda...).

El fin del proyecto era generar una correlación entre un modelo jerárquico y uno probabilístico de mantenimiento. El modelo que se supondrá de control es el jerárquico, ya que es del que se poseen datos, pesos y un modelo matricial de comparación pareada. La hipótesis del es que si se refieren al mismo elemento en las mismas condiciones, los resultados deberían ser parecidos.

El modelo probabilístico, a su vez, tiene algunas dificultades que complican su estudio, entre ellas, la propia red de distribución a la que pertenezca el sistema. El nivel de complejidad de una red de distribución obstaculiza el deseo de modelar un sistema para su estudio, entre otras barreras: las interconexiones, las condiciones externas, tan diferentes dependiendo de su localización, condiciones demográficas, etc. Debido a estas numerosas dificultades el propósito de este estudio, en el fondo, es comprobar si se pueden relacionar estos dos tipos de mantenimiento. Para ello, en esta investigación se han establecido una serie de restricciones: en primer lugar, limitar el estudio a un componente del sistema eléctrico, un conductor eléctrico, suponer despreciar interconexiones, despreciar condiciones externas y en segundo lugar, una vez seleccionado el modelo probabilístico que más se adecua a estas limitaciones, determinar qué datos o valores serán variables y cuáles constantes.

A la vista de los datos obtenidos durante el desarrollo experimental (Apartado 4), queda demostrado que la relación entre ambos modelos es válida y viable, pero requiere unas técnicas de depuración para cada variable del modelo jerárquico (normalizaciones en el



AHP), para reducir los márgenes de error. Sin estas correcciones, la salida del AHP queda muy modificada y no se puede apreciar esta correlación. Cabe mencionar que estas modificaciones han sido viables gracias a que el número de variables utilizadas en este estudio en cuestión han sido adecuadas. El aumento en el número de variables a examinar puede generar un nivel de complejidad y dificultad en el estudio de comparación y correlación probabilístico y jerárquico que puede no sea aconsejable.



6 TRABAJOS FUTUROS

Como ya se anticipa en las conclusiones, no existe mucha bibliografía científica del tema presentado en este proyecto. Este hecho tiene como ventaja el posible desarrollo de trabajos futuros en diversas direcciones y con ello, nuevas vías de investigación, en este campo.

Entre otras opciones, en el presente proyecto, se realiza el estudio con tres variables endógenas y bajo varias restricciones, pero se podría profundizar y afinar todavía más los resultados de la investigación eliminando algunas de estas limitaciones y ampliando el número de variables.

Otro tipo de trabajos futuros, podrían ser llevando este tipo de comparación a otros elementos de la red. El presente proyecto, por ejemplo, está aplicado a una red de distribución eléctrica, pero esta comparación puede aplicarse a otro tipo de líneas, como pueden ser las de transporte. También se puede extrapolar a elementos que no sean líneas eléctricas, por ejemplo los transformadores.



7 PLAN DE TRABAJO

En este punto, tiene como objetivo ordenar y sistematizar la información relevante para realización de este proyecto. El plan de trabajo establece una interrelación entre los recursos humanos, financieros, materiales y tecnológicos disponibles.

7.1 PLANIFICACIÓN

En este apartado se muestran las tareas que se han llevado a cabo a lo largo del proyecto:

1. Estudio preliminar: Es este primer apartado se explica en detalle el tema a estudiar y la situación actual del campo de estudio. Está compuesto por varias subtarefas:

1.1. Presentación del tema: Se realiza un análisis global del mantenimiento de los componentes de las redes eléctricas desde dos puntos de vista:

1.1.1. Nivel general: Se explica en detalle tipos de mantenimientos definidos y nuevas tecnologías desarrolladas y en proceso de investigación.

1.1.2. Nivel nacional: Estudio centrado en el sector eléctrico español. En él se habla de los componentes reguladores de las redes eléctricas.

1.2. Motivación: Explicación del motivo por el que se va a realizar este proyecto, con sus opciones y restricciones.

1.3. Objetivos: Definición y explicación de la finalidad del estudio que en este proyecto se realiza. Realizando un breve resumen de la estrategia que se seguirá.



1.4. Estado del arte: Esta tarea tiene como objeto conocer y sistematizar la documentación y producción científica en el tema a estudio. Con esta exploración documental, se trata de elaborar una lectura de los resultados alcanzados en los procesos sistemáticos de los conocimientos previos a ella. Este proyecto trata de asemejar dos tipo de enfoque del mantenimiento de una línea:

1.4.1. Modelos: Descripción detallada de los artículos publicados en relación con el tema de este proyecto en cuestión, enfocado desde el punto de vista probabilístico.

1.4.2. AHP: Se expone el modelo jerárquico, incluyendo definición, metodología, análisis de sensibilidad, cálculo de prioridades y consistencias.

1.5. Aprendizaje de utilización de la herramienta AHP: La herramienta utilizada para el cálculo de la AHP se llama SEPS. Para su uso óptimo, es necesario conocer la herramienta, y saber cómo utilizarla para que la salida e interpretación de ésta sea correcta.

2. Análisis: Después del estudio preliminar, ya se tiene el conocimiento necesario para comenzar el estudio de éste proyecto. Para ello se realizan las siguientes subtarear:

2.1. Análisis del modelo jerárquico seleccionado en profundidad: En el apartado 1.4.1 de la Planificación (Modelos) se han explicado algunos de los modelos de mantenimiento probabilísticos para líneas eléctricas. Se toma la decisión de trabajar con el que cumpla con las restricciones descritas en el Estudio Preliminar:



2.1.1. Desglose de su fórmula: Es muy importante corroborar que completo conocimiento de la fórmula descrita en el artículo a estudiar, para ello se realiza un análisis exhaustivo y detallado de la fórmula en cuestión.

2.1.2. Comportamiento físico de cada componente de la fórmula: Cada una de las variables y constantes de la fórmula probabilística del artículo seleccionado, debe tener un sentido comprensible y justificado para el lector. Se debe explicar y comprender como se ve afectada la salida en función de cada una de ellas.

2.2. Planteamiento de las variables y constantes del proyecto: Según las restricciones detalladas en los apartados anteriores, se debe justificar qué componentes de la fórmula probabilística se considerarán constantes y cuáles variables. Este punto es de gran importancia porque marcará el desarrollo de los siguientes puntos del proyecto.

2.3. Análisis de la función probabilística para las variables: Con el modelo probabilístico, y las variables y constantes definidas, se procede al estudio y análisis de la salida de la función a medida que las variables van modificándose.

2.3.1. Comportamiento de la temperatura: Se analiza la función de probabilidad manteniendo constantes todas las variables, excepto la temperatura que variará dentro de los límites establecidos.

2.3.2. Comportamiento del factor correctivo: En este punto, se realizará el análisis anterior, estableciendo como variables única, en este caso el factor correctivo.



2.4. Normalización de las variables: Se justifica el motivo por el que se debe normalizar las variables.

2.4.1. Normalización lineal: Se plantea una normalización asumiendo que las entradas (variables) tienen un comportamiento lineal.

2.4.2. Normalización a trozos: En este punto, se rechaza la normalización lineal de las variables y se definen a trozos.

2.5. Análisis de los resultados de la AHP: Se describe el resultado obtenido y el sentido físico que tiene.

2.6. Relación entre la función probabilística y AHP: En este momento se explica y justifica la relación y semejanza entre los dos modelos estudiados en base a los resultados.

2.7. Conclusiones: Se analiza el resultado del experimento.

3. Documentación.

3.1. Estado del arte: Búsqueda de los modelos probabilísticos del mantenimiento de líneas eléctricas.

3.2. AHP.

3.3. Bibliografía.

3.4. Anexos.



7.2 DIAGRAMA DE GANTT

En base a las Tareas anteriormente descritas se plantea un programa cronológico de trabajo. Luego, a partir del esquema se representa un Diagrama de Gantt:

		Tiempos proyecto (semanas)			
Tarea	Descripción	Inicio	Duración	Fin	Predecesor
1	1. Estudio preliminar:	0	14	14	0
2	1.1. Presentación del tema:	0	3	3	0
3	1.2. Motivación:	3	2	5	3
4	1.3. Objetivos:	5	2	7	5
5	1.4. Estado del arte:	7	5	12	7
6	1.5. Aprendizaje de utilización de la herramienta AHP:	12	2	14	12
7	2. Análisis:	14	11	25	14
8	2.1. Análisis del modelo jerárquico seleccionado en profundidad:	14	2	16	14
9	2.2. Planteamiento de las variables y constantes del proyecto:	16	2	18	16
10	2.3. Análisis de la función probabilística para las variables:	18	1	19	18
11	2.4. Normalización de las variables:	19	3	22	19
12	2.5. Análisis de los resultados de la AHP:	22	1	23	22
13	2.6. Relación entre la función probabilística y AHP:	23	1	24	23
14	2.7. Conclusiones:	24	1	25	24
15	3. Documentación.	7	4	11	7
16	3.1. Estado del arte	7	2	9	7
17	3.2. AHP.	10	1	11	10
18	3.4. Anexos.	25	1	26	25
	TOTAL			26	

TABLA 13: TABLA DE LOS TIEMPOS EMPLEADOS EN LAS TAREAS DE LA PLANIFICACIÓN

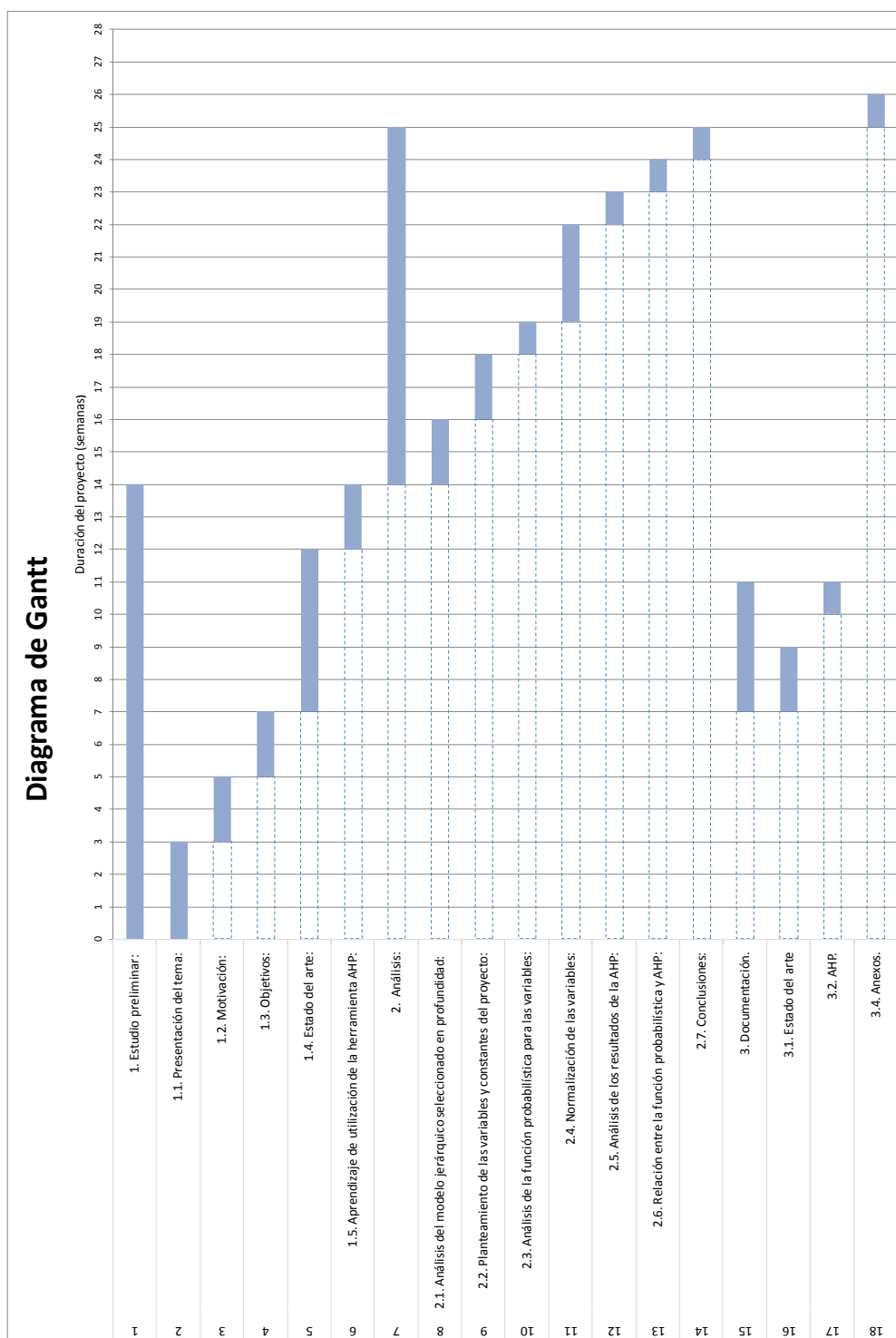


FIGURA 23: DIAGRAMA DE GANTT



7.3 PRESUPUESTO

Una herramienta de planificación y control, expresado en términos económicos del proyecto realizado, es el presupuesto. Éste forma parte del marco estratégico de cualquier estudio.

En este caso, para poder estimar el presupuesto del proyecto, se tomará como supuesto:

- 3 horas diarias de trabajo.
- 17,5€ por hora de trabajo.

Con esta situación, el presupuesto queda del siguiente modo:



Tarea	Descripción	Tiempos Proyecto (semanas)			Precio/Hora €/h	Precio €
		Inicio	Fin	Duración		
1	1. Estudio preliminar:	0	14	14		
2	1.1. Presentación del tema:	0	3	3	17,50	367,50
3	1.2. Motivación:	3	5	2	17,50	245,00
4	1.3. Objetivos:	5	7	2	17,50	245,00
5	1.4. Estado del arte:	7	12	5	17,50	612,50
6	1.5. Aprendizaje de utilización de la herramienta AHP:	12	14	2	17,50	245,00
	SUBTOTAL			14	18	1715,00
7	2. Análisis:	14	25	11		
8	2.1. Análisis del modelo jerárquico seleccionado en profundidad:	14	16	2	17,50	245,00
9	2.2. Planteamiento de las variables y constantes del proyecto:	16	18	2	17,50	245,00
10	2.3. Análisis de la función probabilística para las variables:	18	19	1	17,50	122,50
11	2.4. Normalización de las variables:	19	22	3	17,50	367,50
12	2.5. Análisis de los resultados de la AHP:	22	23	1	17,50	122,50
13	2.6. Relación entre la función probabilística y AHP:	23	24	1	17,50	122,50
14	2.7. Conclusiones:	24	25	1	17,50	122,50
	SUBTOTAL			11	18	1347,50
15	3. Documentación.	7	11	4		
16	3.1. Estado del arte	7	9	2	17,50	245,00
17	3.2. AHP.	10	11	1	17,50	122,50
18	3.4. Anexos.	25	26	1	17,50	122,50
	SUBTOTAL			4	18	490,00
	TOTAL			29	17,5	3552,50

TABLA 14: PRESUPUESTO



8 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de las empresas distribuidoras en España.....	17
Figura 2: Esquema del sistema eléctrico español	18
Figura 3: Curva de la bañera.....	43
Figura 4: Función de distribución probabilidad de Weibull.....	50
Figura 5: Esquema del modelo de decisión en un AHP	60
Figura 6: Esquema del modelo de decisión en un AHP con criterios y subcriterios.....	61
Figura 7: Esquema de determinación de las prioridades entre subcriterios	67
Figura 8: Probabilidad de fallo de un conductor fijando el factor correctivo b.....	76
Figura 9: Probabilidad de fallo de un conductor fijando la temperatura a 330K	78
Figura 10: Probabilidad de fallo de un conductor fijando la temperatura a 355K	79
Figura 11: Probabilidad de fallo de un conductor fijando la temperatura a 370K	80
Figura 12: Histograma de la probabilidad de fallo	81
Figura 13: Esquema del modelo de toma de decisión para este caso	83
Figura 14: Histograma del AHP	87
Figura 15: Modelo genérico de probabilidad (azul) y AHP (rojo)	88
Figura 16: Modelo genérico de probabilidad (azul) y AHP (rojo) normalizada a trozos.....	89
Figura 17: Modelo de la temperatura normalizado	90
Figura 18: Modelo del factor correctivo normalizado.....	92
Figura 19: Modelo de la sobrecarga normalizado	93
Figura 20: histograma del AHP con la entrada normalizada a trozos	96
Figura 21: Histograma de la probabilidad de fallo	97
Figura 22: Modelo de probabilidad de fallo en función del AHP	98
Figura 23: Diagrama de Gantt	108



9 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Probabilidad de evento	32
Tabla 2: Resultado del análisis de equipos de repuesto basados en un criterio de fiabilidad.....	33
Tabla 3: Estadísticas de fallo para cada componente eléctrico del sistema.....	44
Tabla 4: resumen del valor adjudicado a cada nivel de importancia pareado	63
Tabla 5: Relación entre la dimension de la matriz y el índice de consistencia aleatoria	65
Tabla 6: Relación entre la dimensión de la matriz y el umbral	66
Tabla 7: Resumen de las constantes	75
Tabla 8: Resumen de las variables	75
Tabla 9: escala prioridad de Saaty	85
Tabla 10: Valores para la matriz de comparaciones pareadas R	86
Tabla 11: Nuevos valores para la matriz de comparaciones pareadas R.....	94
Tabla 12: Tabla de relaciones entre el modelo probabilístico y el AHP	97
Tabla 13: Tabla de los tiempos empleados en las tareas de la planificación.....	107
Tabla 14: Presupuesto.....	110

10 REFERENCIAS

-
- [1] «Más de 30.000 personas se quedan sin luz en el tercer día de apagones en Sevilla | Economía | EL PAÍS». [En línea]. Disponible en: http://economia.elpais.com/economia/2004/06/30/actualidad/1088580776_850215.html. [Accedido: 26-mar-2014].
- [2] «Un fallo en la red eléctrica alemana deja una hora sin luz a millones de personas en Europa | Actualidad | EL PAÍS». [En línea]. Disponible en: http://elpais.com/elpais/2006/11/04/actualidad/1162631823_850215.html. [Accedido: 26-mar-2014].
- [3] «The SmartGrids European Technology Platform». [En línea]. Disponible en: <http://www.smartgrids.eu/ETPSmartGrids>. [Accedido: 15-jun-2014].
- [4] «Reliability demands will drive automation investments», *Fortnightly*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor>. [Accedido: 19-mar-2014].
- [5] «Red Eléctrica de España: la empresa que transporta la energía y opera el sistema eléctrico español - www.ree.es». [En línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/>. [Accedido: 26-mar-2014].
- [6] L. Bertling, R. Allan, y R. Eriksson, «A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, n.º 1, pp. 75-82, feb. 2005.
- [7] W. Li y I. Ebrary, *Risk assessment of power systems models, methods, and applications*. Hoboken, N.J. [u.a.]: Wiley, 2005.
- [8] «Monte Carlo Methods - Malvin H. Kalos, Paula A. Whitlock - Google Libros». [En línea]. Disponible en: <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=b8Xb4rBkygUC&oi=fnd&pg=PR9&dq=%22monte+carlo%22++simulation&ots=J4EYw6qmzO&sig=X3cU4cRdM8I7AbyAFPvWqLl55Ks#v=onepage&q=%22monte%20carlo%22%20%20simulation&f=false>. [Accedido: 17-abr-2014].
- [9] X. Zhang, E. Gockenbach, V. Wasserberg, y H. Borsi, «Estimation of the Lifetime of the Electrical Components in Distribution Networks», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, n.º 1, pp. 515-522, ene. 2007.
- [10] U. Zickler, A. Machkine, M. Schwan, A. Schnettler, X. Zhang, y E. Gockenbach, «Asset management in distribution systems considering new knowledge on component reliability and damage costs», en *Proc. 15th PSCC*, 2005.
- [11] R. L. Clough, M. Celina, y K. T. Gillen, «Limitations of the Arrhenius methodology». [En línea]. Disponible en: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1535>. [Accedido: 11-abr-2014].
- [12] T. L. Saaty, *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, 2000.



11 ANEXOS

11.1 ANEXO 1: FUNCIÓN DE DENSIDAD PROBABILÍSTICA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON DIFERENTES NIVELES DE CARGA

CONSTANTES				
$L_0=$	4,50E+04	años		
$n=$	7,00			
$b=$	4.000	K		
$B=$	17.000	K		
$S_0=$	5,00	kV/mm		
$\alpha=$	5,10			
$u_0=$	25	°C	298	K

NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,1$

S/S_0	u	T	L	$L + \text{estrés}$	$L + \text{corrección}$	tiempo	P
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	0	0,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	2	1,84E-08
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	4	6,30E-07
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	6	4,98E-06
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	8	2,16E-05
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	10	6,74E-05
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	12	1,71E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	14	3,75E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	16	7,41E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	18	1,35E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	20	2,31E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	22	3,75E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	24	5,84E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	26	8,78E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	28	1,28E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	30	1,81E-02



1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	32	2,51E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	34	3,40E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	36	4,53E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	38	5,92E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	40	7,63E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	42	9,67E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	44	1,21E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	46	1,49E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	48	1,82E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	50	2,19E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	52	2,61E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	54	3,07E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	56	3,57E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	58	4,10E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	60	4,66E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	62	5,24E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	64	5,82E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	66	6,39E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	68	6,95E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	70	7,48E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	72	7,96E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	74	8,39E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	76	8,77E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	78	9,08E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	80	9,34E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	82	9,54E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	84	9,69E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	86	9,80E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	88	9,88E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	90	9,93E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	92	9,96E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	94	9,98E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	96	9,99E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	98	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	100	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	102	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	104	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	106	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	108	1,00E+00



1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	65,7448896	110	1,00E+00
-----	--------	----------	-----------	-------------	------------	-----	----------

NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,2$

S/S_0	v	T	L	$L + \text{estrés}$	$L + \text{corrección}$	tiempo	P
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	0	0,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	2	2,19E-07
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	4	7,53E-06
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	6	5,95E-05
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	8	2,58E-04
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	10	8,05E-04
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	12	2,04E-03
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	14	4,47E-03
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	16	8,81E-03
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	18	1,60E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	20	2,72E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	22	4,39E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	24	6,76E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	26	9,99E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	28	1,42E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	30	1,96E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	32	2,62E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	34	3,39E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	36	4,25E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	38	5,18E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	40	6,12E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	42	7,03E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	44	7,86E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	46	8,55E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	48	9,09E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	50	9,48E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	52	9,73E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	54	9,87E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	56	9,95E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	58	9,98E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	60	9,99E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	62	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	64	1,00E+00



1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	66	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	68	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	70	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	72	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	74	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	76	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	78	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	80	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	82	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	84	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	86	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	88	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	90	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	92	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	94	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	96	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	98	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	100	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	102	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	104	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	106	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	108	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	40,42540989	110	1,00E+00

NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,3$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	0	0,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	2	2,15E-06
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	4	7,37E-05
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	6	5,83E-04
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	8	2,52E-03
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	10	7,86E-03
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	12	1,98E-02
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	14	4,29E-02
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	16	8,30E-02
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	18	1,46E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	20	2,37E-01



1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	22	3,56E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	24	4,96E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	26	6,43E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	28	7,78E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	30	8,82E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	32	9,49E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	34	9,83E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	36	9,96E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	38	9,99E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	40	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	42	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	44	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	46	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	48	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	50	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	52	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	54	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	56	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	58	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	60	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	62	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	64	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	66	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	68	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	70	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	72	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	74	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	76	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	78	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	80	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	82	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	84	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	86	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	88	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	90	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	92	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	94	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	96	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	98	1,00E+00



1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	100	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	102	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	104	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	106	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	108	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	25,844153	110	1,00E+00

NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,4$

S/S₀	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	0	0,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	2	1,78E-05
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	4	6,09E-04
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	6	4,81E-03
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	8	2,07E-02
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	10	6,31E-02
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	12	1,52E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	14	3,04E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	16	5,12E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	18	7,29E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	20	8,93E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	22	9,74E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	24	9,97E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	26	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	28	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	30	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	32	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	34	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	36	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	38	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	40	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	42	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	44	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	46	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	48	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	50	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	52	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	54	1,00E+00



1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	56	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	58	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	60	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	62	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	64	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	66	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	68	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	70	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	72	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	74	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	76	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	78	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	80	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	82	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	84	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	86	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	88	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	90	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	92	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	94	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	96	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	98	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	100	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	102	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	104	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	106	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	108	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	17,07952897	110	1,00E+00



NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,1$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,1	298,00	0,000000	23.092,12	23092,11532	23092,11532	1	0,00E+00
1,1	300,00	0,000022	23.092,12	15786,86132	15854,32715	1	0,00E+00
1,1	302,00	0,000044	23.092,12	10847,14698	10939,43868	1	0,00E+00
1,1	304,00	0,000066	23.092,12	7489,964044	7585,124121	1	0,00E+00
1,1	306,00	0,000088	23.092,12	5196,924046	5284,564461	1	0,00E+00
1,1	308,00	0,000109	23.092,12	3623,05126	3699,082903	1	0,00E+00
1,1	310,00	0,000130	23.092,12	2537,605812	2601,224494	1	0,00E+00
1,1	312,00	0,000151	23.092,12	1785,486367	1837,477667	1	0,00E+00
1,1	314,00	0,000171	23.092,12	1261,925531	1303,734947	1	0,00E+00
1,1	316,00	0,000191	23.092,12	895,8159678	929,0584454	1	0,00E+00
1,1	318,00	0,000211	23.092,12	638,6688837	664,8867227	1	4,00E-15
1,1	320,00	0,000231	23.092,12	457,2666246	477,82457	1	2,16E-14
1,1	322,00	0,000250	23.092,12	328,7500384	344,8034836	1	1,14E-13
1,1	324,00	0,000269	23.092,12	237,3183401	249,8182466	1	5,92E-13
1,1	326,00	0,000288	23.092,12	172,0019662	181,7162701	1	3,00E-12
1,1	328,00	0,000307	23.092,12	125,1527432	132,693365	1	1,49E-11
1,1	330,00	0,000325	23.092,12	91,41578441	97,26569352	1	7,27E-11
1,1	332,00	0,000344	23.092,12	67,02635642	71,56412122	1	3,48E-10
1,1	334,00	0,000362	23.092,12	49,32693285	52,84780791	1	1,63E-09
1,1	336,00	0,000380	23.092,12	36,43408507	39,16752177	1	7,52E-09
1,1	338,00	0,000397	23.092,12	27,00777081	29,13163531	1	3,40E-08
1,1	340,00	0,000415	23.092,12	20,09089333	21,74283252	1	1,51E-07
1,1	342,00	0,000432	23.092,12	14,99728198	16,28370879	1	6,61E-07
1,1	344,00	0,000449	23.092,12	11,23317322	12,23631267	1	2,84E-06
1,1	346,00	0,000466	23.092,12	8,441960946	9,225342925	1	1,20E-05
1,1	348,00	0,000482	23.092,12	6,365172653	6,977895306	1	4,98E-05
1,1	350,00	0,000499	23.092,12	4,81480341	5,294832014	1	2,03E-04
1,1	352,00	0,000515	23.092,12	3,653629985	4,030343925	1	8,18E-04
1,1	354,00	0,000531	23.092,12	2,78115279	3,077309138	1	3,23E-03
1,1	356,00	0,000547	23.092,12	2,123521155	2,356767133	1	1,25E-02
1,1	358,00	0,000562	23.092,12	1,626288076	1,810325557	1	4,73E-02
1,1	360,00	0,000578	23.092,12	1,249181912	1,394663969	1	1,67E-01
1,1	362,00	0,000593	23.092,12	0,962320822	1,077542158	1	4,95E-01
1,1	364,00	0,000608	23.092,12	0,743462722	0,83489165	1	9,19E-01



1,1	366,00	0,000623	23.092,12	0,576000976	0,648689606	1	1,00E+00
1,1	368,00	0,000638	23.092,12	0,447498908	0,505399712	1	1,00E+00
1,1	370,00	0,000653	23.092,12	0,348614898	0,394825283	1	1,00E+00
1,1	372,00	0,000668	23.092,12	0,272311506	0,309262976	1	1,00E+00
1,1	374,00	0,000682	23.092,12	0,213271793	0,242876457	1	1,00E+00
1,1	376,00	0,000696	23.092,12	0,167467262	0,19123145	1	1,00E+00
1,1	378,00	0,000710	23.092,12	0,131837077	0,150949579	1	1,00E+00
1,1	380,00	0,000724	23.092,12	0,104049217	0,119449912	1	1,00E+00
1,1	382,00	0,000738	23.092,12	0,08232211	0,094755433	1	1,00E+00
1,1	384,00	0,000752	23.092,12	0,065291069	0,075347723	1	1,00E+00
1,1	386,00	0,000765	23.092,12	0,051907989	0,060057546	1	1,00E+00
1,1	388,00	0,000778	23.092,12	0,041365819	0,047982241	1	1,00E+00
1,1	390,00	0,000792	23.092,12	0,033041539	0,038423183	1	1,00E+00
1,1	392,00	0,000805	23.092,12	0,026452981	0,03083832	1	1,00E+00
1,1	394,00	0,000818	23.092,12	0,021226068	0,024806052	1	1,00E+00
1,1	396,00	0,000830	23.092,12	0,017069869	0,019997674	1	1,00E+00
1,1	398,00	0,000843	23.092,12	0,013757577	0,016156295	1	1,00E+00
1,1	400,00	0,000856	23.092,12	0,011111959	0,013080684	1	1,00E+00
1,1	402,00	0,000868	23.092,12	0,008994193	0,010612842	1	1,00E+00
1,1	404,00	0,000880	23.092,12	0,007295297	0,008628433	1	1,00E+00
1,1	406,00	0,000893	23.092,12	0,005929519	0,007029394	1	1,00E+00
1,1	408,00	0,000905	23.092,12	0,004829238	0,005738211	1	1,00E+00

NIVEL DE CARGA $S/S_0 = 1,2$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,2	298,00	0,000000	12.558,67	12558,67413	12558,67413	1	0,00E+00
1,2	300,00	0,000022	12.558,67	8585,70313	8656,028003	1	0,00E+00
1,2	302,00	0,000044	12.558,67	5899,233663	5995,621998	1	0,00E+00
1,2	304,00	0,000066	12.558,67	4073,42577	4172,99933	1	0,00E+00
1,2	306,00	0,000088	12.558,67	2826,353266	2918,231346	1	0,00E+00
1,2	308,00	0,000109	12.558,67	1970,400696	2050,257341	1	0,00E+00
1,2	310,00	0,000130	12.558,67	1380,079911	1447,022367	1	0,00E+00
1,2	312,00	0,000151	12.558,67	971,0388644	1025,846263	1	0,00E+00
1,2	314,00	0,000171	12.558,67	686,2996871	730,4532282	1	2,44E-15
1,2	316,00	0,000191	12.558,67	487,1905696	522,359509	1	1,38E-14



1,2	318,00	0,000211	12.558,67	347,3408249	375,1270069	1	7,44E-14
1,2	320,00	0,000231	12.558,67	248,6849926	270,5107625	1	3,94E-13
1,2	322,00	0,000250	12.558,67	178,7910957	195,8640196	1	2,05E-12
1,2	324,00	0,000269	12.558,67	129,0658589	142,3823022	1	1,04E-11
1,2	326,00	0,000288	12.558,67	93,54347198	103,9098525	1	5,19E-11
1,2	328,00	0,000307	12.558,67	68,06446686	76,1247238	1	2,54E-10
1,2	330,00	0,000325	12.558,67	49,71658206	55,97997278	1	1,22E-09
1,2	332,00	0,000344	12.558,67	36,45236291	41,3188272	1	5,72E-09
1,2	334,00	0,000362	12.558,67	26,82651055	30,60854929	1	2,64E-08
1,2	336,00	0,000380	12.558,67	19,8147201	22,75562456	1	1,20E-07
1,2	338,00	0,000397	12.558,67	14,68820798	16,97690385	1	5,34E-07
1,2	340,00	0,000415	12.558,67	10,92645601	12,7093999	1	2,34E-06
1,2	342,00	0,000432	12.558,67	8,156289477	9,546895465	1	1,01E-05
1,2	344,00	0,000449	12.558,67	6,109174493	7,195222145	1	4,26E-05
1,2	346,00	0,000466	12.558,67	4,591170407	5,440591358	1	1,77E-04
1,2	348,00	0,000482	12.558,67	3,461706647	4,12708476	1	7,25E-04
1,2	350,00	0,000499	12.558,67	2,618536508	3,140596402	1	2,91E-03
1,2	352,00	0,000515	12.558,67	1,987030972	2,397336247	1	1,15E-02
1,2	354,00	0,000531	12.558,67	1,512533222	1,835570243	1	4,42E-02
1,2	356,00	0,000547	12.558,67	1,154879482	1,409665151	1	1,59E-01
1,2	358,00	0,000562	12.558,67	0,884458686	1,085780357	1	4,82E-01
1,2	360,00	0,000578	12.558,67	0,679369055	0,838740681	1	9,14E-01
1,2	362,00	0,000593	12.558,67	0,523359313	0,649758946	1	1,00E+00
1,2	364,00	0,000608	12.558,67	0,404333078	0,504771979	1	1,00E+00
1,2	366,00	0,000623	12.558,67	0,313258809	0,393220949	1	1,00E+00
1,2	368,00	0,000638	12.558,67	0,243372808	0,30715455	1	1,00E+00
1,2	370,00	0,000653	12.558,67	0,189594623	0,240567547	1	1,00E+00
1,2	372,00	0,000668	12.558,67	0,148096934	0,188911415	1	1,00E+00
1,2	374,00	0,000682	12.558,67	0,115988116	0,148731217	1	1,00E+00
1,2	376,00	0,000696	12.558,67	0,091077268	0,117395354	1	1,00E+00
1,2	378,00	0,000710	12.558,67	0,07169975	0,092893859	1	1,00E+00
1,2	380,00	0,000724	12.558,67	0,056587289	0,073687403	1	1,00E+00
1,2	382,00	0,000738	12.558,67	0,044770977	0,058593957	1	1,00E+00
1,2	384,00	0,000752	12.558,67	0,035508625	0,046703485	1	1,00E+00
1,2	386,00	0,000765	12.558,67	0,028230221	0,037313545	1	1,00E+00
1,2	388,00	0,000778	12.558,67	0,022496849	0,029880558	1	1,00E+00
1,2	390,00	0,000792	12.558,67	0,01796968	0,02398283	1	1,00E+00
1,2	392,00	0,000805	12.558,67	0,014386485	0,019292411	1	1,00E+00
1,2	394,00	0,000818	12.558,67	0,011543822	0,015553643	1	1,00E+00



1,2	396,00	0,000830	12.558,67	0,009283468	0,012566743	1	1,00E+00
1,2	398,00	0,000843	12.558,67	0,007482075	0,010175227	1	1,00E+00
1,2	400,00	0,000856	12.558,67	0,006043252	0,008256239	1	1,00E+00
1,2	402,00	0,000868	12.558,67	0,004891502	0,006713106	1	1,00E+00
1,2	404,00	0,000880	12.558,67	0,003967556	0,005469586	1	1,00E+00
1,2	406,00	0,000893	12.558,67	0,003224776	0,004465416	1	1,00E+00
1,2	408,00	0,000905	12.558,67	0,002626387	0,00365286	1	1,00E+00

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,3$

S/S₀	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,3	298,00	0,000000	7.171,48	7171,484228	7171,484228	1	0,00E+00
1,3	300,00	0,000022	7.171,48	4902,765528	4960,6577	1	0,00E+00
1,3	302,00	0,000044	7.171,48	3368,688506	3448,177414	1	0,00E+00
1,3	304,00	0,000066	7.171,48	2326,082226	2408,342392	1	0,00E+00
1,3	306,00	0,000088	7.171,48	1613,956033	1689,991001	1	0,00E+00
1,3	308,00	0,000109	7.171,48	1125,174312	1191,374762	1	0,00E+00
1,3	310,00	0,000130	7.171,48	788,0785197	843,6679937	1	0,00E+00
1,3	312,00	0,000151	7.171,48	554,5004059	600,0898059	1	6,77E-15
1,3	314,00	0,000171	7.171,48	391,9034233	428,6923227	1	3,76E-14
1,3	316,00	0,000191	7.171,48	278,2044865	307,5559668	1	2,05E-13
1,3	318,00	0,000211	7.171,48	198,3449226	221,5729376	1	1,09E-12
1,3	320,00	0,000231	7.171,48	142,0086614	160,2837029	1	5,69E-12
1,3	322,00	0,000250	7.171,48	102,0965677	116,415	1	2,91E-11
1,3	324,00	0,000269	7.171,48	73,70155177	84,88737239	1	1,46E-10
1,3	326,00	0,000288	7.171,48	53,41690749	62,13842705	1	7,14E-10
1,3	328,00	0,000307	7.171,48	38,8674191	45,65934216	1	3,44E-09
1,3	330,00	0,000325	7.171,48	28,39007371	33,67605684	1	1,62E-08
1,3	332,00	0,000344	7.171,48	20,81569624	24,92904778	1	7,53E-08
1,3	334,00	0,000362	7.171,48	15,31896563	18,52057237	1	3,43E-07
1,3	336,00	0,000380	7.171,48	11,31496456	13,8082755	1	1,53E-06
1,3	338,00	0,000397	7.171,48	8,387529671	10,33079004	1	6,73E-06
1,3	340,00	0,000415	7.171,48	6,239425131	7,755504417	1	2,90E-05
1,3	342,00	0,000432	7.171,48	4,657553875	5,841750157	1	1,23E-04
1,3	344,00	0,000449	7.171,48	3,488572766	4,414758188	1	5,14E-04
1,3	346,00	0,000466	7.171,48	2,621734256	3,347164523	1	2,11E-03
1,3	348,00	0,000482	7.171,48	1,976767163	2,545828542	1	8,48E-03
1,3	350,00	0,000499	7.171,48	1,495284699	1,942403734	1	3,33E-02



1,3	352,00	0,000515	7.171,48	1,134670837	1,486568641	1	1,24E-01
1,3	354,00	0,000531	7.171,48	0,863714436	1,141150463	1	3,99E-01
1,3	356,00	0,000547	7.171,48	0,659480444	0,878600031	1	8,56E-01
1,3	358,00	0,000562	7.171,48	0,505059806	0,678435012	1	9,99E-01
1,3	360,00	0,000578	7.171,48	0,387945767	0,525379204	1	1,00E+00
1,3	362,00	0,000593	7.171,48	0,298858225	0,408003994	1	1,00E+00
1,3	364,00	0,000608	7.171,48	0,230889683	0,31773323	1	1,00E+00
1,3	366,00	0,000623	7.171,48	0,178882786	0,248111997	1	1,00E+00
1,3	368,00	0,000638	7.171,48	0,138975201	0,194267632	1	1,00E+00
1,3	370,00	0,000653	7.171,48	0,108265796	0,152511203	1	1,00E+00
1,3	372,00	0,000668	7.171,48	0,084569025	0,120041977	1	1,00E+00
1,3	374,00	0,000682	7.171,48	0,066233659	0,094727592	1	1,00E+00
1,3	376,00	0,000696	7.171,48	0,05200861	0,074940066	1	1,00E+00
1,3	378,00	0,000710	7.171,48	0,040943305	0,059433116	1	1,00E+00
1,3	380,00	0,000724	7.171,48	0,032313511	0,047250105	1	1,00E+00
1,3	382,00	0,000738	7.171,48	0,025565943	0,037654792	1	1,00E+00
1,3	384,00	0,000752	7.171,48	0,020276786	0,030079086	1	1,00E+00
1,3	386,00	0,000765	7.171,48	0,016120538	0,024083519	1	1,00E+00
1,3	388,00	0,000778	7.171,48	0,012846563	0,019327273	1	1,00E+00
1,3	390,00	0,000792	7.171,48	0,010261376	0,015545375	1	1,00E+00
1,3	392,00	0,000805	7.171,48	0,008215234	0,01253132	1	1,00E+00
1,3	394,00	0,000818	7.171,48	0,006591965	0,01012378	1	1,00E+00
1,3	396,00	0,000830	7.171,48	0,005301216	0,008196426	1	1,00E+00
1,3	398,00	0,000843	7.171,48	0,004272551	0,006650099	1	1,00E+00
1,3	400,00	0,000856	7.171,48	0,003450929	0,005406792	1	1,00E+00
1,3	402,00	0,000868	7.171,48	0,002793235	0,004404997	1	1,00E+00
1,3	404,00	0,000880	7.171,48	0,002265626	0,003596108	1	1,00E+00
1,3	406,00	0,000893	7.171,48	0,001841471	0,00294163	1	1,00E+00
1,3	408,00	0,000905	7.171,48	0,001499767	0,002411007	1	1,00E+00

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,4$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	L+corrección	tiempo	P
1,4	298,00	0,000000	4.268,90	4268,902777	4268,902777	1	0,00E+00
1,4	300,00	0,000022	4.268,90	2918,423678	2962,692018	1	0,00E+00
1,4	302,00	0,000044	4.268,90	2005,247904	2066,130778	1	0,00E+00
1,4	304,00	0,000066	4.268,90	1384,625352	1447,733737	1	0,00E+00
1,4	306,00	0,000088	4.268,90	960,7246103	1019,151592	1	0,00E+00

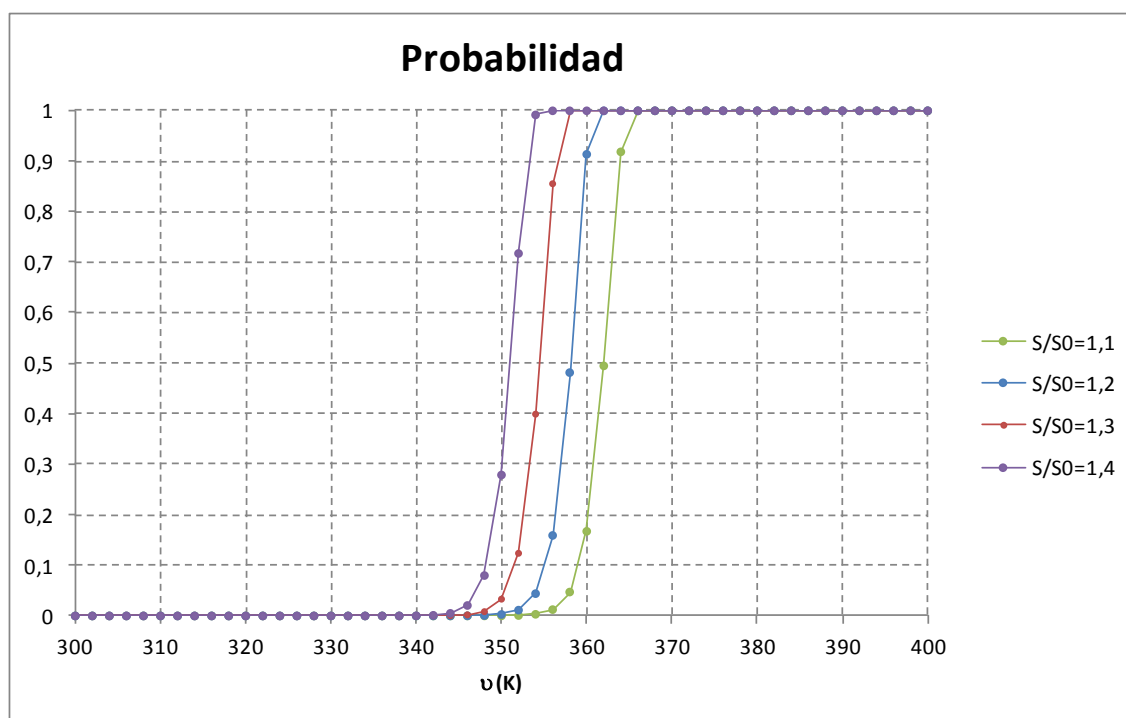


1,4	308,00	0,000109	4.268,90	669,7720572	720,723608	1	2,66E-15
1,4	310,00	0,000130	4.268,90	469,1121774	511,9649835	1	1,52E-14
1,4	312,00	0,000151	4.268,90	330,0723041	365,2716606	1	8,53E-14
1,4	314,00	0,000171	4.268,90	233,2847091	261,7336282	1	4,67E-13
1,4	316,00	0,000191	4.268,90	165,6041995	188,3369063	1	2,50E-12
1,4	318,00	0,000211	4.268,90	118,066939	136,0846454	1	1,31E-11
1,4	320,00	0,000231	4.268,90	84,53217631	98,72949119	1	6,73E-11
1,4	322,00	0,000250	4.268,90	60,77407515	71,91440299	1	3,39E-10
1,4	324,00	0,000269	4.268,90	43,87163787	52,58767962	1	1,67E-09
1,4	326,00	0,000288	4.268,90	31,79698616	38,60290722	1	8,10E-09
1,4	328,00	0,000307	4.268,90	23,1362474	28,44417773	1	3,84E-08
1,4	330,00	0,000325	4.268,90	16,89949537	21,03654189	1	1,79E-07
1,4	332,00	0,000344	4.268,90	12,39076607	15,61470767	1	8,18E-07
1,4	334,00	0,000362	4.268,90	9,118778324	11,63170963	1	3,67E-06
1,4	336,00	0,000380	4.268,90	6,735353812	8,695123402	1	1,62E-05
1,4	338,00	0,000397	4.268,90	4,992766849	6,522339856	1	7,02E-05
1,4	340,00	0,000415	4.268,90	3,71408462	4,909080858	1	2,99E-04
1,4	342,00	0,000432	4.268,90	2,772458816	3,707150854	1	1,25E-03
1,4	344,00	0,000449	4.268,90	2,076610294	2,808655487	1	5,15E-03
1,4	346,00	0,000466	4.268,90	1,560615389	2,134765769	1	2,07E-02
1,4	348,00	0,000482	4.268,90	1,176691821	1,627689303	1	8,00E-02
1,4	350,00	0,000499	4.268,90	0,890084229	1,244912509	1	2,79E-01
1,4	352,00	0,000515	4.268,90	0,675424965	0,955056909	1	7,18E-01
1,4	354,00	0,000531	4.268,90	0,514135267	0,734886627	1	9,92E-01
1,4	356,00	0,000547	4.268,90	0,392562796	0,567139883	1	1,00E+00
1,4	358,00	0,000562	4.268,90	0,300642258	0,438952326	1	1,00E+00
1,4	360,00	0,000578	4.268,90	0,230928872	0,340706865	1	1,00E+00
1,4	362,00	0,000593	4.268,90	0,177898559	0,26519192	1	1,00E+00
1,4	364,00	0,000608	4.268,90	0,137439556	0,206983402	1	1,00E+00
1,4	366,00	0,000623	4.268,90	0,106481894	0,161989543	1	1,00E+00
1,4	368,00	0,000638	4.268,90	0,082726476	0,127114616	1	1,00E+00
1,4	370,00	0,000653	4.268,90	0,064446374	0,100009737	1	1,00E+00
1,4	372,00	0,000668	4.268,90	0,050340618	0,078887648	1	1,00E+00
1,4	374,00	0,000682	4.268,90	0,039426295	0,062384643	1	1,00E+00
1,4	376,00	0,000696	4.268,90	0,030958682	0,04945734	1	1,00E+00
1,4	378,00	0,000710	4.268,90	0,024371941	0,039305287	1	1,00E+00
1,4	380,00	0,000724	4.268,90	0,019234963	0,031312772	1	1,00E+00
1,4	382,00	0,000738	4.268,90	0,015218402	0,025004943	1	1,00E+00
1,4	384,00	0,000752	4.268,90	0,012069974	0,020014644	1	1,00E+00



1,4	386,00	0,000765	4.268,90	0,009595923	0,016057271	1	1,00E+00
1,4	388,00	0,000778	4.268,90	0,007647054	0,012911656	1	1,00E+00
1,4	390,00	0,000792	4.268,90	0,006108194	0,010405509	1	1,00E+00
1,4	392,00	0,000805	4.268,90	0,004890206	0,00840429	1	1,00E+00
1,4	394,00	0,000818	4.268,90	0,003923938	0,006802687	1	1,00E+00
1,4	396,00	0,000830	4.268,90	0,003155606	0,005518073	1	1,00E+00
1,4	398,00	0,000843	4.268,90	0,002543282	0,004485469	1	1,00E+00
1,4	400,00	0,000856	4.268,90	0,002054202	0,00365366	1	1,00E+00
1,4	402,00	0,000868	4.268,90	0,001662703	0,002982186	1	1,00E+00
1,4	404,00	0,000880	4.268,90	0,001348638	0,002439015	1	1,00E+00
1,4	406,00	0,000893	4.268,90	0,001096155	0,001998732	1	1,00E+00
1,4	408,00	0,000905	4.268,90	0,000892753	0,001641127	1	1,00E+00

GRÁFICA CON LOS DATOS OBTENIDOS:





11.3 ANEXO 3: FUNCIÓN DE DENSIDAD PROBABILÍSTICA EN FUNCIÓN DEL FACTOR CORRECTIVO CON DIFERENTES NIVELES DE CARGA

CONSTANTES		
$L_0=$	4,50E+04	años
$n=$	7,00	
$B=$	17.000	K
$S_0=$	5,00	kV/mm
$\alpha=$	5,10	
$v_0=$	25	C
		298 K

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,1$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	b	L+corrección	tiempo	P
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,50E+05	0,01287204	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,45E+05	0,01522803	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,40E+05	0,018015241	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,35E+05	0,021312599	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,30E+05	0,025213479	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,25E+05	0,029828342	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,20E+05	0,035287872	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,15E+05	0,041746668	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,10E+05	0,049387629	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,05E+05	0,058427126	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,00E+05	0,069121137	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,95E+05	0,081772491	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,90E+05	0,096739442	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,85E+05	0,114445819	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,80E+05	0,135393022	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,75E+05	0,160174225	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,70E+05	0,189491172	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,65E+05	0,224174048	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,60E+05	0,265204986	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,55E+05	0,313745883	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,50E+05	0,371171299	1	1,00E+00



1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,45E+05	0,439107382	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,40E+05	0,519477916	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,35E+05	0,614558798	1	1,00E+00
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,30E+05	0,727042488	1	9,94E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,25E+05	0,860114249	1	8,84E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,20E+05	1,01754235	1	6,00E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,15E+05	1,203784771	1	3,22E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,10E+05	1,424115443	1	1,52E-01
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,05E+05	1,684773594	1	6,75E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,00E+05	1,993140427	1	2,92E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-9,50E+04	2,35794814	1	1,25E-02
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-9,00E+04	2,789527198	1	5,33E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-8,50E+04	3,300098869	1	2,26E-03
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-8,00E+04	3,904121297	1	9,62E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-7,50E+04	4,618698927	1	4,08E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-7,00E+04	5,464066855	1	1,73E-04
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-6,50E+04	6,464163841	1	7,35E-05
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-6,00E+04	7,647310194	1	3,12E-05
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-5,50E+04	9,047009737	1	1,32E-05
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-5,00E+04	10,70289855	1	5,62E-06
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-4,50E+04	12,66186736	1	2,38E-06
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-4,00E+04	14,97938941	1	1,01E-06
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-3,50E+04	17,72109126	1	4,29E-07
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-3,00E+04	20,96461122	1	1,82E-07
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,50E+04	24,80179789	1	7,73E-08
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-2,00E+04	29,34131104	1	3,28E-08
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,50E+04	34,71169861	1	1,39E-08
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-1,00E+04	41,0650369	1	5,91E-09
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	-5,00E+03	48,58123696	1	2,51E-09
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	0,00E+00	57,47313926	1	1,06E-09
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	5,00E+03	67,99254081	1	4,51E-10
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	1,00E+04	80,43732543	1	1,91E-10
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	1,50E+04	95,15989908	1	8,13E-11
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	2,00E+04	112,5771692	1	3,45E-11
1,1	333,00	0,000353	23.092,12	57,47313926	2,50E+04	133,1823504	1	1,46E-11

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,2$



S/S ₀	υ	T	L	L + estrés	b	L+corrección	tiempo	P
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,50E+05	3,25916E-06	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,45E+05	4,49513E-06	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,40E+05	6,19981E-06	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,35E+05	8,55097E-06	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,30E+05	1,17938E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,25E+05	1,62663E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,20E+05	2,2435E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,15E+05	3,0943E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,10E+05	4,26775E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,05E+05	5,88622E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,00E+05	8,11845E-05	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,95E+05	0,000111972	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,90E+05	0,000154435	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,85E+05	0,000213002	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,80E+05	0,000293779	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,75E+05	0,000405188	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,70E+05	0,000558848	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,65E+05	0,00077078	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,60E+05	0,001063084	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,55E+05	0,001466237	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,50E+05	0,002022279	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,45E+05	0,002789188	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,40E+05	0,003846933	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,35E+05	0,005305807	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,30E+05	0,00731793	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,25E+05	0,010093111	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,20E+05	0,013920724	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,15E+05	0,019199885	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,10E+05	0,026481064	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,05E+05	0,036523486	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,00E+05	0,0503743	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-9,50E+04	0,069477762	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-9,00E+04	0,095825837	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-8,50E+04	0,132165901	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-8,00E+04	0,182287218	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-7,50E+04	0,25141606	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-7,00E+04	0,346760655	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-6,50E+04	0,478262812	1	1,00E+00



1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-6,00E+04	0,659634576	1	1,00E+00
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-5,50E+04	0,909788013	1	8,02E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-5,00E+04	1,254807219	1	2,70E-01
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-4,50E+04	1,730668173	1	5,91E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-4,00E+04	2,386990033	1	1,18E-02
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-3,50E+04	3,292209048	1	2,29E-03
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-3,00E+04	4,540714566	1	4,45E-04
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,50E+04	6,262691242	1	8,64E-05
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-2,00E+04	8,637693699	1	1,68E-05
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,50E+04	11,91336912	1	3,25E-06
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-1,00E+04	16,43128	1	6,31E-07
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	-5,00E+03	22,66251971	1	1,22E-07
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	0,00E+00	31,25683451	1	2,38E-08
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	5,00E+03	43,11037412	1	4,61E-09
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	1,00E+04	59,45913546	1	8,94E-10
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	1,50E+04	82,00784293	1	1,74E-10
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	2,00E+04	113,1077041	1	3,37E-11
1,2	333,00	0,000353	12.558,67	31,25683451	2,50E+04	156,0015759	1	6,53E-12

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,3$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	b	L+corrección	tiempo	P
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,50E+05	1,60179E-09	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,45E+05	2,54417E-09	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,40E+05	4,04098E-09	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,35E+05	6,4184E-09	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,30E+05	1,01945E-08	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,25E+05	1,61923E-08	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,20E+05	2,57186E-08	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,15E+05	4,08496E-08	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,10E+05	6,48825E-08	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,05E+05	1,03055E-07	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,00E+05	1,63684E-07	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,95E+05	2,59985E-07	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,90E+05	4,12941E-07	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,85E+05	6,55885E-07	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,80E+05	1,04176E-06	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,75E+05	1,65466E-06	1	1,00E+00



1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,70E+05	2,62814E-06	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,65E+05	4,17434E-06	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,60E+05	6,63022E-06	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,55E+05	1,0531E-05	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,50E+05	1,67266E-05	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,45E+05	2,65674E-05	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,40E+05	4,21977E-05	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,35E+05	6,70237E-05	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,30E+05	0,000106456	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,25E+05	0,000169086	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,20E+05	0,000268565	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,15E+05	0,000426568	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,10E+05	0,00067753	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,05E+05	0,00107614	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,00E+05	0,001709263	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-9,50E+04	0,00271487	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-9,00E+04	0,004312102	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-8,50E+04	0,006849031	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-8,00E+04	0,010878504	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-7,50E+04	0,017278627	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-7,00E+04	0,02744412	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-6,50E+04	0,043590251	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-6,00E+04	0,069235597	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-5,50E+04	0,109968805	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-5,00E+04	0,174666483	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-4,50E+04	0,277427586	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-4,00E+04	0,440645876	1	1,00E+00
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-3,50E+04	0,699889982	1	9,98E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-3,00E+04	1,111654537	1	4,42E-01
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,50E+04	1,765671521	1	5,36E-02
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-2,00E+04	2,804464712	1	5,19E-03
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,50E+04	4,454408549	1	4,91E-04
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-1,00E+04	7,075059794	1	4,64E-05
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	-5,00E+03	11,23751235	1	4,38E-06
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	0,00E+00	17,8488504	1	4,14E-07
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	5,00E+03	28,34982073	1	3,91E-08
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	1,00E+04	45,02880115	1	3,69E-09
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	1,50E+04	71,52048517	1	3,49E-10
1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	2,00E+04	113,5979566	1	3,29E-11



1,3	333,00	0,000353	7.171,48	17,8488504	2,50E+04	180,4307635	1	3,11E-12
------------	--------	----------	----------	------------	----------	-------------	---	-----------------

NIVEL DE SOBRECARGA $S/S_0 = 1,4$

S/S_0	v	T	L	L + estrés	b	L+corrección	tiempo	P
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,50E+05	1,38489E-12	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,45E+05	2,50677E-12	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,40E+05	4,53745E-12	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,35E+05	8,21316E-12	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,30E+05	1,48665E-11	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,25E+05	2,69095E-11	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,20E+05	4,87084E-11	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,15E+05	8,81662E-11	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,10E+05	1,59588E-10	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,05E+05	2,88867E-10	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,00E+05	5,22873E-10	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,95E+05	9,46443E-10	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,90E+05	1,71314E-09	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,85E+05	3,10092E-09	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,80E+05	5,61291E-09	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,75E+05	1,01598E-08	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,70E+05	1,83901E-08	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,65E+05	3,32876E-08	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,60E+05	6,02533E-08	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,55E+05	1,09063E-07	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,50E+05	1,97413E-07	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,45E+05	3,57334E-07	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,40E+05	6,46804E-07	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,35E+05	1,17077E-06	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,30E+05	2,11918E-06	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,25E+05	3,8359E-06	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,20E+05	6,94328E-06	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,15E+05	1,25679E-05	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,10E+05	2,27489E-05	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,05E+05	4,11774E-05	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,00E+05	7,45344E-05	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-9,50E+04	0,000134913	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-9,00E+04	0,000244204	1	1,00E+00



1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-8,50E+04	0,000442029	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-8,00E+04	0,000800109	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-7,50E+04	0,001448262	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-7,00E+04	0,002621471	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-6,50E+04	0,004745075	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-6,00E+04	0,008588971	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-5,50E+04	0,015546733	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-5,00E+04	0,028140847	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-4,50E+04	0,050937216	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-4,00E+04	0,09220049	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-3,50E+04	0,166890363	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-3,00E+04	0,30208509	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,50E+04	0,546798506	1	1,00E+00
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-2,00E+04	0,989749631	1	6,51E-01
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,50E+04	1,791527083	1	4,98E-02
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-1,00E+04	3,24280928	1	2,48E-03
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	-5,00E+03	5,86974773	1	1,20E-04
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	0,00E+00	10,62471932	1	5,83E-06
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	5,00E+03	19,23160344	1	2,83E-07
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	1,00E+04	34,81076157	1	1,37E-08
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	1,50E+04	63,01030096	1	6,65E-10
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	2,00E+04	114,0537537	1	3,23E-11
1,4	333,00	0,000353	4.268,90	10,62471932	2,50E+04	206,4465419	1	1,56E-12

RESULTADO GRÁFICO:

